

Master Thesis:

One String Inerting System (OSIriS)

Autor: Martin Keim, B.Sc.

Fakultät: Life Sciences

Dept. Environmental Engineering and Process Engineering

Betreuung HAW Hamburg: Prof. Dr. Marion Siegers

Betreuung DLR e.V.: Dr. Gwénaëlle Renouard-Vallet



ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit mit dem im Ausgabeantrag formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den 5. März 2012

Martin Keim, B.Sc.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Marion Siegers von der HAW Hamburg bedanken. Vielen Dank für das Interesse und die ausgezeichnete Betreuung. Ich habe mehr gelernt als ich erwarten durfte.

Natürlich geht mein Dank auch an meine Kollegen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt Hamburg. Ganz besonders standen mir Dr. Gwénaëlle Renouard-Vallet, Martin Saballus und Robin Auffermann zur Seite und das nicht nur in der letzten Zeit in der ich meine Thesis verfasst habe.

Ich bedanke mich bei all meinen Freunden für das: „Aha, soso...interessant!“ Ich hatte steht's das Gefühl das es euch wenigstens ein bisschen interessiert.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mich immer gefördert haben, ohne zu fordern.

Zum Schluss noch der größte Dank an meine Großmutter, die für mich wieder und wieder Steine aus dem Weg geräumt hat!

INHALTSVERZEICHNIS

Erklärung	2
Danksagung	3
I. Abbildungsverzeichnis	7
II. Tabellenverzeichnis	9
III. Verwendete Abkürzungen	10
IV. Begriffe und Definitionen	12
1 Einleitung	13
1.1 Motivation	13
1.2 Ziel der Thesis	15
1.3 Zusammenfassung	15
2 Einführung in die Brennstoffzellentechnik	16
2.1 Geschichte	16
2.2 Funktionsweise	17
2.3 Typen von Brennstoffzellen	18
2.3.1 Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell)	20
2.3.2 Alkalische Brennstoffzelle (AFC - Alkaline Fuel Cell)	20
2.3.3 Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC - Protone Exchange Membrane Fuel Cell)	20
2.3.4 Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC - Direct Methanol Fuel Cell)	21
2.3.5 Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle (MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell)	21
2.3.6 Oxidkeramische-Brennstoffzelle (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)	21
2.4 Aufbau einer Brennstoffzelle am Beispiel PEMFC	22
2.5 Energieliefernder Prozess der Brennstoffzelle	23
3 Einführung zu Silicagel (Kieselgel)	24
3.1 Allgemeine Informationen zu Silicagel	24

3.2	Herstellung	28
4	Anforderungen an ein Inerting System	29
5	Bisherige Technologien	31
5.1	Zonal Dryer	31
5.2	Ultradryer	33
6	One String Inerting System (OSIriS)	34
6.1	Auslegung	35
6.1.1	Material	35
6.1.2	Unterdruckfähigkeit / Crossoverproblematik	35
6.1.3	Beiprodukte / Maximierung des Wasseroutputs	35
6.1.4	Silicagelrotoren	36
6.1.5	Wärmequelle	37
6.1.6	Belüftung der Trocknungseinheiten	38
6.1.7	Bypass	38
6.1.8	Medienfluss durch das System	39
6.2	Komponenten / verwendete Materialien	40
6.2.1	Trocknungskörper / Silicagelwaben	40
6.2.2	Brennstoffzelle / Kondensation / Abscheidung	42
6.2.3	Kartuschen	43
6.2.4	Verrohrung	43
6.2.5	Ventile	43
6.2.6	Heizer	44
6.3	Instrumentierung / Sensoren	46
6.4	Programmierung (Software)	47
6.4.1	Heizersteuerung	48
6.4.2	Ventilsteuerung	49

6.4.3	Berechnung der absoluten Feuchte.....	54
6.5	Pass/Fail Kriterien.....	55
6.6	Verwendete Formeln.....	56
6.7	Versuchsreihen und Auswertung.....	58
6.7.1	Trocknungsprozess (dry).....	62
6.7.2	Regenerationprozess (reg).....	64
6.7.3	Ruhezustand (rest).....	66
6.7.4	Der Umschaltvorgang.....	68
6.7.5	Belastung der Brennstoffzelle.....	70
6.7.6	vary condensation temperature (VCT).....	72
6.7.7	vary regeneration temperature (VRT).....	75
6.7.8	vary moisture loading (VML).....	79
7	Fazit / Empfehlungen.....	81
8	Literaturverzeichnis.....	84
9	Anhang.....	87
9.1	Liste der Sensoren.....	87
9.2	Abbildungen.....	90
9.3	Programmierung der Steuerungssoftware.....	99
9.4	Erläuterungen zur Gottheit Osiris.....	107

I. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schema Brennstoffzelle Grove.....	17
Abbildung 2: Brennstoffzellentypen.....	18
Abbildung 3: Schematische Abbildung einer PEM-Zelle.....	22
Abbildung 4: Energieliefernder Prozess der Brennstoffzelle.....	23
Abbildung 5: SiO ₂ -Ketten mit Koordinationszahl 3, Quelle: (Iler, 1955), S.123.....	24
Abbildung 6: Siliziumdioxid (Silicagel) als Kügelchen und Trocknungssäckchen.....	27
Abbildung 7: 500NM design mission.....	30
Abbildung 8: Zonal Dryer CTT Systems (CTT Systems).....	32
Abbildung 10: Ultradryer.....	33
Abbildung 9: Kohlefaserummantelte Molekularsiebfasern mit elektrischem Anschluss Quelle: (Ultra Electronics Precision Air Systems, 2010).....	33
Abbildung 11: Fließbild OSiriS Gesamtaufbau.....	39
Abbildung 12: Silicagel Rotor Proflute.....	40
Abbildung 13: Aufnahmeverhalten in Abhängigkeit von rel. Feuchte der Silicagelrotoren.....	41
Abbildung 14: Nahaufnahme der Silicagelrotorenstruktur.....	41
Abbildung 15: Heizerkonstruktion aus Edelstahl.....	44
Abbildung 16: Aufbau OSiriS.....	45
Abbildung 17: Positionen der Sensoren.....	46
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von absoluter Feuchte und O ₂ -Konzentration mit Grenzwerten.....	60
Abbildung 19: Temperaturverlauf Ausgang Gesamtsystem.....	61
Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf Trocknungsphase (dry) Einheit 1.....	63
Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Regenerationsphase (reg) Einheit 1.....	65
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Ruhephase (rest) Einheit 1.....	66
Abbildung 23: Umschaltung Status 11 nach 2.....	69

Abbildung 24: Umschaltung Status 2 nach 22	69
Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Stabilität der BZ.....	70
Abbildung 26: Stabilität der BZ bei einer Umschaltung	71
Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Eingang (VCT).....	72
Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VCT).....	73
Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VCT)	74
Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Temperatur am Eingang der Regeneration (VRT)	75
Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VRT).....	76
Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte BZ in (VRT).....	78
Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VRT)	78
Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VML)	80
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VML)	80
Abbildung 36: Brennstoffzelle Hydrogenics angeschlossen an den ODA Trockner.....	90
Abbildung 37: Kartuschen aus PVDF	91
Abbildung 38: Kondensator AlfaLaval Typ: AlfaNova 27	91
Abbildung 39: Zyklonabscheider Mankenberg Typ AS2	92
Abbildung 40: Klemmringverschraubung nach DIN32676	92
Abbildung 41: Pneumatikkugelhahn mit Steuerungsventil und Sinterbronzeschalldämpfer .	93
Abbildung 42: Belüftungsventil / Thermoelement Typ K	93
Abbildung 43: Heizer mit BCTEX Isolierung und eingeschraubten Heizelementen	94
Abbildung 44: Heizelemente Carlo Loysch	94
Abbildung 45: Messblock 2 mit Sensoren	95
Abbildung 46: PIP10 industrial PC MPL.....	95
Abbildung 47: Steuerschrank OSIrIS.....	96
Abbildung 48: Graphical User Interface (GUI) OSIrIS	97
Abbildung 49: Positionen der Sensoren Großformat.....	98

II. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Spezifische Eigenschaften der Brennstoffzellentypen.....	19
Tabelle 2: Physikalisch / chemische Eigenschaften von Silicagel.....	26
Tabelle 3: Anforderungen an die Silicagelrotoren	36
Tabelle 4: Leistungsdaten FC Hydrogenics	42
Tabelle 5: Sicherheitswerte Heizer.....	48
Tabelle 6: Phasen OSIrS.....	49
Tabelle 7: Stellungen Ventile binär (1 = offen; 0 = geschlossen)	50
Tabelle 8: Übersicht Positionen und Phasen OSIrS.....	51
Tabelle 9: Umschaltsschritte OSIrS	53
Tabelle 10: Sicherheitswerte für Überhitzungsschutz der BZ	53
Tabelle 11: Molare Massen	56
Tabelle 12: Testparameter für Versuchsreihen	58
Tabelle 13: Versuchsmatrix statische Vermessung	59
Tabelle 14: Alternative Schaltfolge (1 = offen; 0 = geschlossen)	67
Tabelle 15: Alternativer Phasenverlauf OSIrS.....	67
Tabelle 16: Trocknerleistung bei variabler Kondensatortemperatur (VCT)	73
Tabelle 17: Übersicht vary regeneration temperature (VRT)	77
Tabelle 18: Übersicht vary moisture loading (VML)	79
Tabelle 19: Liste der Sensoren und berechneten Werte der Datenaufzeichnung.....	87

III. VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

AEA	All Electrical Aircraft
ASM	Air Separation Module
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSP	British Standard Pipe
BZ	Brennstoffzelle
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
FC	Fuel Cell
FTIS	Fuel Tank Inerting System
GDL	Gas Diffusion Layer
GUI	Graphical User Interface
IGCS	Inert Gas Conditioning System
MFM	Massflowmeter
MEA	More Electrical Aircraft
NM	Nautic Miles
ODA	Oxygen Depleted Air
OSIriS	One String Inerting System
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Protone Exchange Membrane Fuel Cell
PTFE	Polytetraflourethylen / Teflon
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PTS	Purchaser Technical Specification
TBD	to be defined / noch nicht definiert
TC	Thermocouple (Typ K)

rf	Relative Feuchte
SRD	System Requirement Document
VCT	vary condensation temperature
VEP	vary environmental pressure
VML	vary moisture loading
VRT	vary regeneration temperature

IV. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

dryer

Trocknungseinheit

spec. humidity

absolute Feuchte

Taxi bzw. Taxiing

Fahrten eines Flugzeuges am Boden

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die weltweit steigende Nachfrage nach Energie, Mobilität und anderen Konsumgütern und die damit einhergehende Veränderung des Klimas durch steigende CO₂-Emissionen, zwingen uns, über alternative ökologisch verträgliche Energiequellen nachzudenken. Wasserkraft, Wind- und Sonnenenergie sind die Energiequellen der Zukunft. Eine Speicherung dieser Energie in Form von Wasserstoff ist dann interessant, wenn diese, mit wenig Verlust, wiedergewonnen werden kann. Durch die hohen Wirkungsgrade von bis zu 65%¹, die eine Brennstoffzelle erreicht, bietet sie sich für diese Aufgabe an. Da bei der heutigen Produktion von Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen ebenfalls CO₂ emittiert wird, ist die Wissenschaft gefragt, andere Wege, wie zum Beispiel die verbesserte Elektrolyse von Wasser² mit Hilfe von Sonnen- oder Windenergie³, Wasserstofferzeugung aus Biomasse⁴ oder die Wasserstoffsynthese mit Hilfe von Algen⁵, zu verfeinern und durch eine Verbesserung des Wirkungsgrades wirtschaftlich interessant zu machen.

Bei bisherigen Anwendungen der Brennstoffzellentechnik stand immer die gewonnene elektrische Energie im Fokus, sei es in der Fahrzeugtechnik, bei der Raumfahrt oder bei der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie⁶. Die Brennstoffzelle liefert mehr interessante Produkte als nur elektrische Energie. Gerade in der Luftfahrt sind elektrische Energie, aber auch die „Abfallprodukte“ Wasser, Abwärme und ein sauerstoffarmer Luftstrom (Inertgas), von Interesse.

Eine wichtige Triebfeder für die Brennstoffzellentechnik in der Luftfahrt ist der gewünschte Wandel zu MEAs (More Electrical Aircraft) und AEAs (All Electrical Aircraft). In diesen neuen Ansätzen verdrängen elektrische Systeme mehr und mehr die mechanischen und hydraulischen Komponenten, die bis heute die Steuerung der Flugzeuge garantieren.⁷ Während in den aktuellen Passagierflugzeugkonzepten die Energie für die an Bord befindlichen elektrischen Geräte durch Generatoren in den Triebwerken gewonnen wird, kann die Brennstoffzelle alternativ diese Energie bei hohen Wirkungsgraden zur Verfügung stellen und damit die Triebwerke entlasten.

Gerade in diesem Jahr zeigte das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt, dass es möglich ist, mit einem Elektromotor im Bugfahrwerk, betrieben durch eine Brennstoffzelle, einen A320 geräusch- und emissionslos während des Taxiing (Wege, die das Flugzeug am Boden zurücklegt) zu bewegen.

¹ (Kurzweil, 2003) S. 171

² (Schrader, 2008)

³ (Kurzweil, 2003)

⁴ (Gülzower Fachgespräche - Band 25 - Wasserstoff aus Biomasse, 2007)

⁵ (Nees, 2005) S.8

⁶ (Kurzweil, 2003)

⁷ (Gründel, 2003)

Neben einer Minimierung von Geräusch- und Abgasemissionen kann zusätzlich das von der Brennstoffzelle abgegebene Inertgas nutzbar gemacht werden. Dadurch ist es möglich, die Mitnahme von schweren Stickstoffflaschen oder anderem schwerem Equipment zur Inertisierung der Treibstofftanks zu vermeiden. Dies wird in Zukunft nötig sein, da, wegen neuer, gesetzlich geforderter Sicherheitskonzepte, die Bildung einer explosionsfähigen Kerosin-Luft Atmosphäre innerhalb der Treibstofftanks verhindert werden muss.

1.2 ZIEL DER THESIS

In der Vergangenheit gab es einige Versuche, ein Inertgas für den Gebrauch in den Treibstofftanks auf technisch mehr oder weniger aufwendige Weisen zur Verfügung zu stellen. Doch hatten alle diese Versuche mit Problemen zu kämpfen.

Ziel dieser Thesis ist es, zu zeigen, dass es mit geringem Aufwand möglich ist, das vermeintliche „Abfallprodukt“ Kathodenabluft einer Brennstoffzelle so weit aufzubereiten, dass es als Inertgas in Frage kommt. Des Weiteren soll gezeigt werden, dass es mit dem vorliegenden Design gelingen kann, das volle Potenzial der Druckdifferenz zwischen Kabine und Atmosphäre auf Reishöhe eines Passagierflugzeuges auszunutzen. Die Druckdifferenz soll dazu genutzt werden, den benötigten Luftstrom in Bewegung zu setzen, ohne dass zusätzliche elektrische Energie für ein Gebläse benötigt wird. Die Nutzung der Druckdifferenz verbessert somit den Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems.

Die in dieser Arbeit geleistete Entwicklungsarbeit bezieht sich auf die Trocknungseinheit, welche in ein bestehendes Brennstoffzellensystem integriert wird. Die Entwicklung beinhaltet das erdachte verfahrenstechnische Layout, Material- und Komponentenauslegung sowie Material- und Komponentenbeschaffung. Nach Aufbau und Integration des Trocknungssystems in den bestehenden Brennstoffzellenaufbau wird das System statisch vermessen.

1.3 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird die Neuauslegung eines Trockners für die Konditionierung eines Inertgases beschrieben, welches von einer Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt wird. Das aufbereitete Inertgas soll in den Treibstofftanks von Verkehrsflugzeugen zum Brandschutz eingesetzt werden. Zu diesem Zweck darf das Gas einen Sauerstoffgehalt von 11,1% und eine absolute Feuchte von 2 (g H₂O)/(kg Luft) nicht überschreiten. Die zugrundeliegenden Anforderungen an das entwickelte System basieren auf den Vorgaben der Airbus Operations GmbH an ein Inertgas.

Die Ausarbeitung teilt sich in:

- theoretische Vorarbeit
- Vergleich mit bisherigen Technologien
- Auslegung der gewünschten Parameter und Material
- Beschreibung der Komponenten
- Testläufe sowie deren Auswertung

Es hat sich gezeigt, dass es mit dem erarbeiteten verfahrenstechnischen Design möglich ist das Inertgas so weit zu trocknen, dass es problemlos in einem Treibstofftank zur Anwendung kommen kann. Das hoch gesteckte Ziel was den Inertgrad des Gases angeht, konnte hingegen nicht in allen Fällen erreicht werden. Es wird gezeigt, dass der Trockner in der vorliegenden Ausführung im Verbund mit allen Peripheriesystemen in einer luftfahrtrelevanten Umgebung funktioniert. Der Trockner arbeitet als Peripheriesystem einer Brennstoffzelle, ohne diese maßgeblich zu beeinflussen.

2 EINFÜHRUNG IN DIE BRENNSTOFFZELLENTECHNIK

Bei der Erzeugung elektrischer Energie aus einem fossilen Energieträger wird in der heutigen Zeit auf Generatoren gesetzt. Beim Umwandlungsprozess chemisch gebundener in elektrische Energie müssen drei Umwandlungsschritte vollzogen werden. Durch die Verbrennung des Energieträgers findet eine Umwandlung in thermische Energie statt. In einer Turbine wird thermische in mechanische Energie transformiert, damit ein Generator diese in elektrische Energie umsetzen kann. Bei jedem Umwandlungsschritt geht nutzbare Energie verloren.⁸

Brennstoffzellen zählen zu den galvanischen Elementen. Es gibt nur einen Umwandlungsschritt von chemischer direkt in elektrische Energie. Der Umweg über Wärme und Mechanik fällt bei einer Brennstoffzelle weg. Durch diese Direktverstromung werden höhere Wirkungsgrade als bei thermischen Verfahren erzielt. Zusätzliche Attraktivität gewinnt diese Technik durch den Wegfall umweltrelevanter Emissionen. Wegen der wesentlich einfacheren Bauart, ohne bewegliche Teile, haben Brennstoffzellen das Potenzial, in den Punkten Zuverlässigkeit und Lebensdauer die Generatorentechnik zu überholen. Dies ist technisch allerdings noch nicht umgesetzt.⁹

2.1 GESCHICHTE

1839 baute der walisische Jurist und Physiker Sir William Robert Grove (1811-1896) die erste Brennstoffzelle (siehe Abbildung 1). Durch die Entdeckung des elektrodynamischen Prinzips (Werner von Siemens 1816 - 1892) gegen Ende des 19. Jahrhunderts, schien die Technik der Brennstoffzelle in Vergessenheit zu geraten. Der rasanten Entwicklung von Generatoren hatte die Brennstoffzelle, aufgrund konstruktiver Probleme und mangelhafter Materialien, damals nichts entgegenzusetzen. W. Ostwald lobte schon 1894 den hohen Wirkungsgrad und die Umweltfreundlichkeit der Brennstoffzellentechnik, im Gegensatz zur verlustreichen Dampfmaschine/Dynamo Kopplung, die damals lediglich einen Wirkungsgrad von 10% aufwies. Erst in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts, als die groben Werkstoffprobleme ausgeräumt waren, erlebte die Brennstoffzelle ein Comeback in Raumkapseln und U-Booten. Dennoch ist bis heute, besonders bei den Hochtemperaturbrennstoffzellen, weitere Materialforschung dringend nötig. Schließlich bekam die Brennstoffzelle auch in den übrigen Bereichen der Forschung wieder Aufmerksamkeit, da angesichts der endlichen fossilen Energiequellen Alternativen gefunden werden müssen.¹⁰

⁸ (Kurzweil, 2003) S.2

⁹ (Kurzweil, 2003) S.3, S.13

¹⁰ (Kurzweil, 2003) S.2; (Hirschl & Hoffmann, 2003) S.7

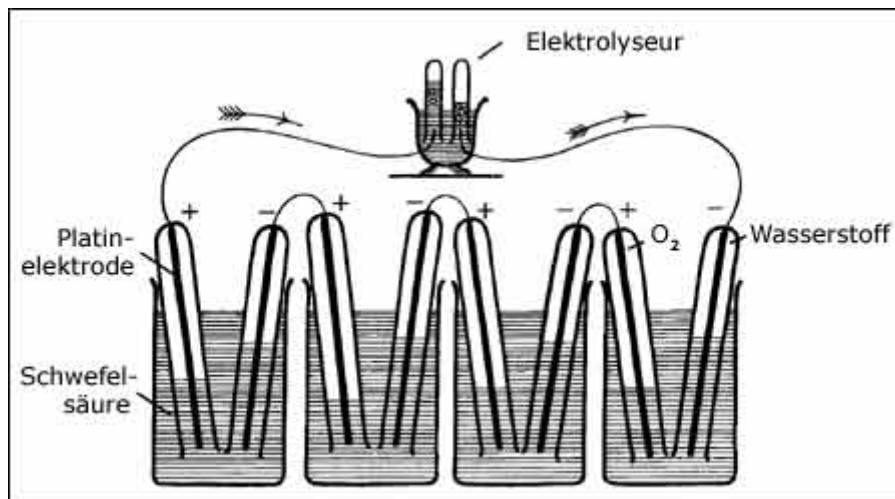
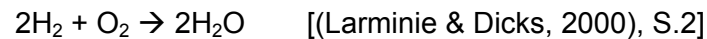


Abbildung 1: Schema Brennstoffzelle Grove¹¹

2.2 FUNKTIONSWEISE

Bei jeder Brennstoffzelle findet man 2 Elektroden (Anode/Kathode), die räumlich durch einen Elektrolyten getrennt sind. An der Kathode wird das Oxidationsmittel (reiner Sauerstoff oder Luft) an der Anode der Brennstoff zugeführt. Elektrolyt, Brennstoff und Arbeitstemperatur unterscheiden sich je nach Bauart der Brennstoffzelle. Die einzelnen Typen werden im Kapitel 2.3 kurz erläutert. Die sonst explosiv ablaufende Reaktion von Wasser- und Sauerstoff



kann innerhalb der Brennstoffzelle kontrolliert ablaufen. Der bei der chemischen Reaktion entstehende Elektronenfluss wird über einen äußeren Stromkreis geführt, an dem ein elektrischer Verbraucher betrieben wird.¹²

In den Kapiteln 2.4 und 2.5 werden Aufbau und innere Abläufe der Brennstoffzelle anhand einer PEMFC genauer beschrieben.

¹¹ (diebrennstoffzelle.de, 2000)

¹² (Hirschl & Hoffmann, 2003) S.7

2.3 TYPEN VON BRENNSTOFFZELLEN

Die Klassifizierung von Brennstoffzellen hängt vom verwendeten Elektrolyten ab. Die Betriebstemperatur wiederum wird vom Elektrolyten bestimmt. Aufgeteilt sind die Temperaturbereiche in Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturzellen.¹³ In Abbildung 2 sind die verschiedenen Typen mit Elektrolyten, Brennstoffen, Temperaturbereichen und mit jeweiligem mobilem Ion dargestellt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Typen übersichtlich aufgeführt.

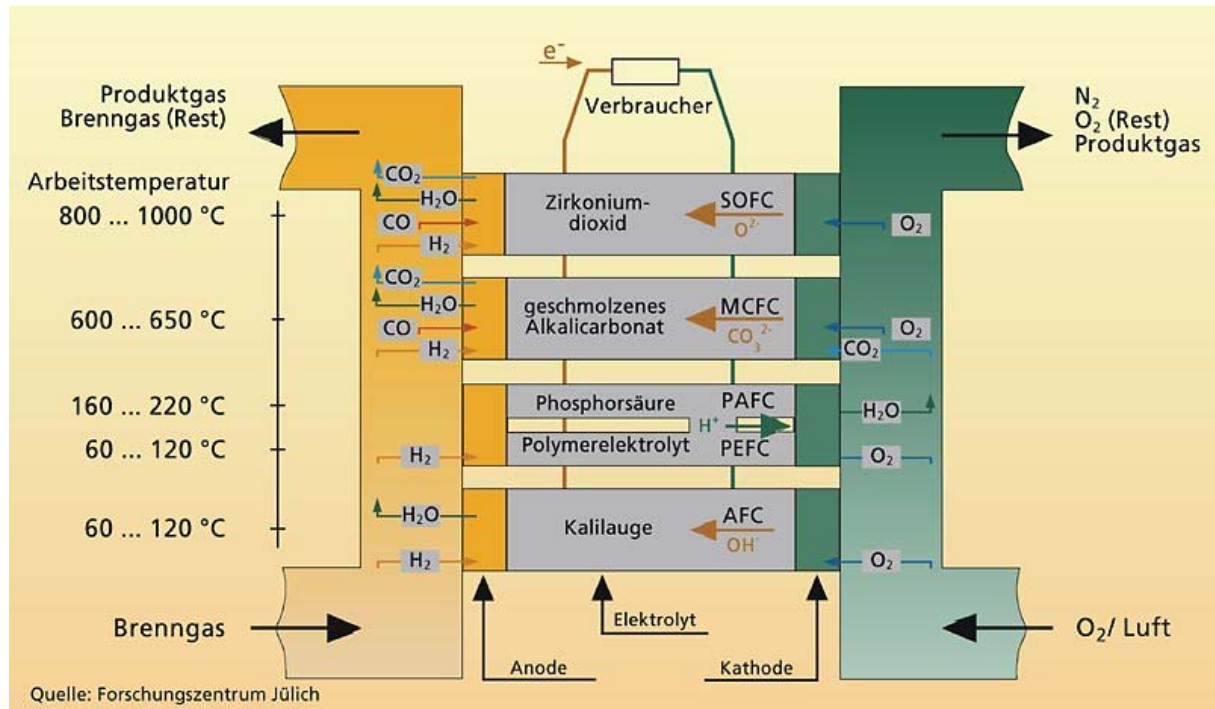


Abbildung 2: Brennstoffzellentypen¹⁴

¹³ (Kurzweil, 2003) S.7

¹⁴ (Forschungszentrum Jülich)

Tabelle 1: Spezifische Eigenschaften der Brennstoffzellentypen¹⁵

	AFC	PEMFC (DMFC)	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Kalilauge 25-50% KOH	Polymer	Phosphorsäure	(Li,K,Na) ₂ CO ₃ -Schmelze in MgO-Matrix	Keramik
Ion	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Temperatur	60-200°C	50-120°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Brennstoff	H ₂	H ₂ (Methanol)	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO, CH ₄
Reaktion Anode	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (DMFC Kapitel 2.3.4)	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Katalysator	Ag, Pt, Pd, Ru	Pt, Ru	Pt	-	-
Anode	Ni, C, PTFE, elektrisch leitende Kunststoffe	Kohlenstoff	Kohlenstoff, PTFE	Ni-Legierungen	Ni/Keramik Verbundwerkstoff
Ox.-Gas	O ₂	O ₂ / Luft	Luft	Luft (+CO ₂)	Luft
Reaktion Kathode	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (DMFC Kapitel 2.3.4)	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
Katalysator	Ag, Au, Pt, Pd	Pt	Pt	-	-
Kathode	Kohlenstoff, PTFE, NiO, elektrisch leitende Kunststoffe	Kohlenstoff	Kohlenstoff, PTFE	Ag ₂ O, NiO	Metalloxide

¹⁵ (Sura, 2004) S.22

2.3.1 PHOSPHORSÄURE BRENNSTOFFZELLE (PAFC - PHOSPHORIC ACID FUEL CELL)

Die PAFC ist die am weitesten entwickelte Zelle. Der verwendete Elektrolyt, Phosphorsäure, ist flüssig. Es ist wichtig, dass eine bestimmte Temperatur gehalten wird, um ein Auskristallisieren des Elektrolyts zu verhindern. Sollte es trotz aller Vorsichtsmaßnahmen zu einer starken Abkühlung kommen, würde der Stack durch ein Auskristallisieren des Elektrolyts irreparabel beschädigt.

Die PAFC toleriert 1-3% CO und H₂S, so dass auch wasserstoffreiche Gase aus fossilen Quellen, nach Reformierung und Shiftreaktion, ohne aufwendige Feinreinigung verwendet werden können. Biogas, Deponiegas oder Klärgas können unter bestimmten Bedingungen verwendet werden. Von allen Brennstoffzellen ist die Kommerzialisierung der PAFC am weitesten fortgeschritten. Sie eignet sich besonders für den stationären Einsatz, zum Beispiel in Blockheizkraftwerken (BHKW). Es gibt bereits Prototypanlagen, die im Megawatt-Bereich arbeiten.¹⁶

2.3.2 ALKALISCHE BRENNSTOFFZELLE (AFC - ALKALINE FUEL CELL)

Diese Brennstoffzelle wurde in den fünfziger Jahren von Varta und Siemens entwickelt. Bei der Apollo-Mission hatte die AFC als erste Brennstoffzelle eine spezifische Anwendung. Die AFC muss mit reinem Wasserstoff und Sauerstoff betrieben werden, da sie eine hohe CO₂-Unverträglichkeit zeigt. Kommt der Elektrolyt mit in Luft enthaltenem CO₂ in Kontakt, bildet sich aus Kalilauge (KOH) und Kohlendioxid (CO₂) schlechtlösliches Kaliumkarbonat (K₂CO₃), was die Poren der Gasdiffusionselektrode verstopft. Da bei der Raumfahrt immer reiner Sauerstoff mitgeführt wird, kam die AFC für diese Anwendung in Frage. Auch wegen der hohen Kosten bieten sich nur Einsätze in der Raumfahrt und im Militär an. Die AFC gibt es als Mittel- und Niedertemperaturzelle.¹⁷

2.3.3 POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLE (PEMFC - PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL)

Bei der PEMFC wird eine Polymermembran als Elektrolyt verwendet. Die PEMFC stellt hohe Ansprüche an einen möglichen Reformierungsprozess, da die verwendeten Platinkatalysatoren eine Kohlenmonoxid (CO)-Unverträglichkeit zeigen. Die Platinatome werden von den CO-Atomen besetzt und stehen dadurch für die katalytische Unterstützung der Wasserstoffreaktion nicht zur Verfügung. Durch Zulegieren von Ruthenium wird die CO-Verträglichkeit verbessert. Ein Betrieb mit anderen Brennstoffen als hochreinem Wasserstoff (< 10ppm CO) ist aufgrund der Katalysatorempfindlichkeit nicht möglich. Diese Brennstoffzelle eignet sich besonders für mobile Einsätze in Fahrzeugen oder in transportablen Stromversorgungen. Vorteile zeigt die PEMFC bei schnell wechselnden Lastenanfragen, die ohne Probleme kompensiert werden. Durch die geringe Betriebstemperatur und die damit verbundene kurze Aufheizzeit lässt sich eine PMFC in kurzer Zeit aus dem Ruhezustand auf Volllast fahren.

¹⁶ (Kurzweil, 2003) S.139 (Hirschl & Hoffmann, 2003) S.9

¹⁷ (Kurzweil, 2003) S.50; (Hirschl & Hoffmann, 2003) S.9; (Heinzel, Mahlendorf, & Roes, 2006) S.11

Nachteilig wirken sich die mangelhafte Peakleistung und eine relativ kurze Lebensdauer aus. Die für diese Arbeit verwendete Brennstoffzelle ist vom Typ PEMFC.¹⁸

2.3.4 DIREKT-METHANOL-BRENNSTOFFZELLE (DMFC - DIRECT METHANOL FUEL CELL)

Die DMFC unterscheidet sich in Aufbau und Material nicht von der PEMFC. Die verwendeten Membranen sind zwar dicker als die bei der PEMFC, aber aus dem gleichen Material. Die DMFC kann direkt mit Methanol oder Methanoldampf betrieben werden, was einen weiteren Reformationsprozess von Methanol in Wasserstoff unnötig macht. Methanol (CH_3OH) wird mit Sauerstoff (O_2) in Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) umgesetzt ($\text{CH}_3\text{OH} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). Besonders für mobile Einsätze in Kleinverbrauchern wie Laptops oder Mobiltelefonen stellt die DMFC eine interessante Variante dar. Eine serienmäßige Umsetzung solcher Geräte gibt es noch nicht.¹⁹

2.3.5 SCHMELZCARBONAT-BRENNSTOFFZELLE (MCFC - MOLTEN CARBONATE FUEL CELL)

Die MCFC nutzt wie die PAFC einen flüssigen Elektrolyten. Es werden dafür schmelzflüssige Alkalicarbonate verwendet. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen innerhalb des Stacks findet eine interne Reformierung statt. Das heißt, die Umsetzung von Brenngas in Wasserstoff findet innerhalb der Zelle, und damit ohne zusätzlichen Reformator, statt. Auch Sondergase (z.B. $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) können von der MCFC verarbeitet werden, da der Elektrolyt, im Gegensatz zu dem in der AFC verwendeten, keine CO_2 -Unverträglichkeit zeigt. Wegen der hohen Betriebstemperaturen und des besonders aggressiven Elektrolyts sind Entwicklungen in der Werkstofftechnik nötig. Aufgrund von langen Aufheizzeiten bieten sich nur stationäre Anwendungen, wie die des BHKWs, an.²⁰

2.3.6 OXIDKERAMISCHE-BRENNSTOFFZELLE (SOFC – SOLID OXIDE FUEL CELL)

Wie die MCFC ist die SOFC eine Hochtemperaturzelle, die bei 800-1000°C arbeitet. Im Gegensatz zum Flüssigelektrolyten der MCFC, besitzt die SOFC festes yttriumstabilisiertes Zirkoniumdioxid als Elektrolyten. Die Oxidkeramische-Brennstoffzelle wird als Direktbrennstoffzelle bezeichnet, da sie, wie die MCFC, durch die hohe Betriebstemperatur den Reformierungsprozess intern durchführen kann. Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe können, neben Wasserstoff (H_2), direkt als Brennstoff eingesetzt werden. Da die SOFC bis zu 50ppm H_2S verträgt, und somit mehr als alle anderen Typen, ließe sich heimische, entschwefelte Kohle effizient nutzen. Der SOFC Technik wird ein großes Wirkungsgradpotential zugesprochen. SOFC-Kraftwerke, die im 50MW-Bereich arbeiten, sollen, mit einer zusätzlichen Nutzung der Abwärme in Gas- und Dampfturbinen, einen Wirkungsgrad von 65% erreichen. Wegen der hohen Betriebstemperaturen und der großen Temperaturunterschiede sind

¹⁸ (Kurzweil, 2003), S.73; (Hirschl & Hoffmann, 2003), S.10

¹⁹ (Kurzweil, 2003), S.121; (Hirschl & Hoffmann, 2003), S.10

²⁰ (Kurzweil, 2003), S.155; (Hirschl & Hoffmann, 2003), S.10

weitere Entwicklungen bei Dichtungskonzepten und Materialien erforderlich. Die SOFC-Technik ist von den genannten Techniken die am wenigsten weit entwickelte.²¹

2.4 AUFBAU EINER BRENNSTOFFZELLE AM BEISPIEL PEMFC

Eine einzelne Zelle besteht aus zwei Elektroden, die räumlich durch eine Membran (PEM) getrennt sind. Die Anode wird mit dem Brennstoff Wasserstoff versorgt, der dort katalytisch gespalten wird. Als Katalysator dienen Platin oder Ruthenium, um eine größere Effizienz zu erreichen. Der Einsatz von Katalysatoren ist wegen der geringen Betriebstemperatur von 50-90°C nötig. Die Kathode wird mit Umgebungsluft versorgt, in welcher der Luftsauerstoff als Oxidationsmittel dient²².

Da eine Zelle theoretisch nur eine Spannung von 1,229V²³ liefern kann, werden sie in der Praxis mit Hilfe von Bipolarplatten in einer Reihenschaltung zusammengefasst. Diese Platten sind auf der einen Seite Teil der Anode (Elektronenakzeptor) und auf der anderen Teil der Kathode (Elektronendonator). Auf beiden Seiten sind Gaskanäle eingefräst, durch welche das Gas an den Elektrolyten, die Elektrode und den Katalysator geführt wird (siehe Abbildung 3). Die GDL (Gas Diffusion Layer) genannte Verbindung aus poröser Elektrode und Katalysator ist direkt auf die Membran aufgebracht. Alle drei Teile zusammen ergeben die Membrane Electrode Assembly (siehe Abbildung 3). Eine solche Reihenschaltung vieler Zellen wird als Stack bezeichnet²⁴.

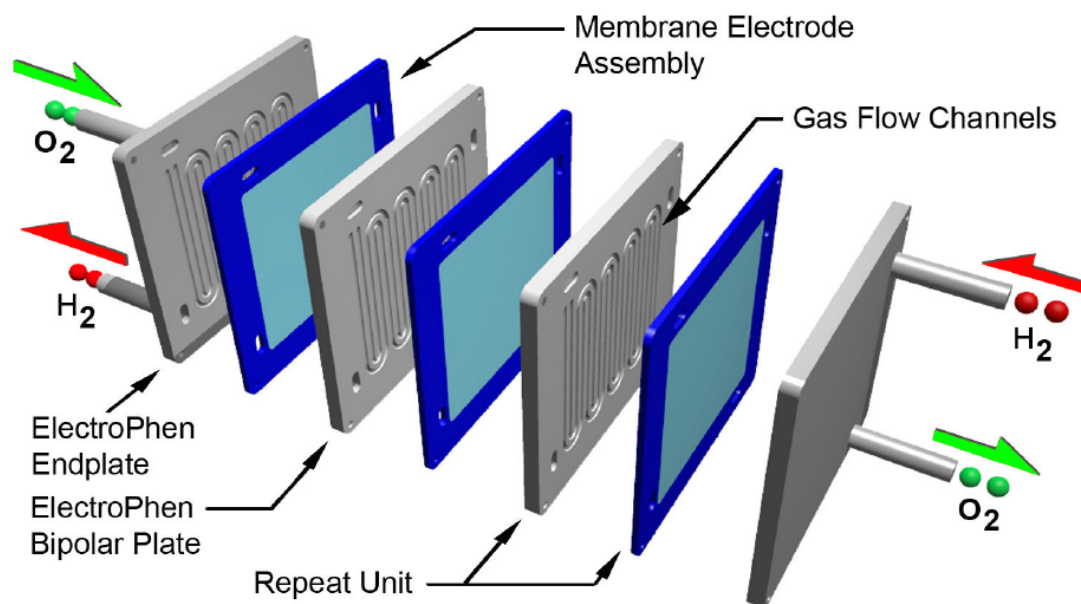


Abbildung 3: Schematische Abbildung einer PEM-Zelle²⁵

²¹ (Kurzweil, 2003), S.171; (Hirschl & Hoffmann, 2003), S.10

²² (Kurzweil, 2003), S.75

²³ (Kordes & Simader, 1996), S.32

²⁴ (Kurzweil, 2003), S.9

²⁵ (autobloggreen, 2008)

2.5 ENERGIELIEFERNDER PROZESS DER BRENNSTOFFZELLE

Wasserstoff (H_2) wird an der Anode katalytisch in H^+ -Kationen gespalten. Dies findet unter Abgabe von Elektronen an die Anode statt (Oxidation). Während H^+ -Kationen die gas- und elektronendichte PEM durchwandern, müssen die abgegebenen Elektronen über einen externen Stromkreis zur Kathode laufen, in den ein elektrischer Verbraucher eingesetzt wird. An der Kathode wird Sauerstoff (O_2), durch Aufnahme der vom Wasserstoff abgegebenen Elektronen (e^-), zu O^{2-} reduziert. Die entstandenen O^{2-} -Ionen reagieren mit den H^+ -Ionen zu H_2O . Wasser und Abwärme sind die einzigen Beiprodukte, welche bei dieser Umsetzung von chemisch gebundener Energie in elektrische anfallen.²⁶ (siehe Abbildung 4).

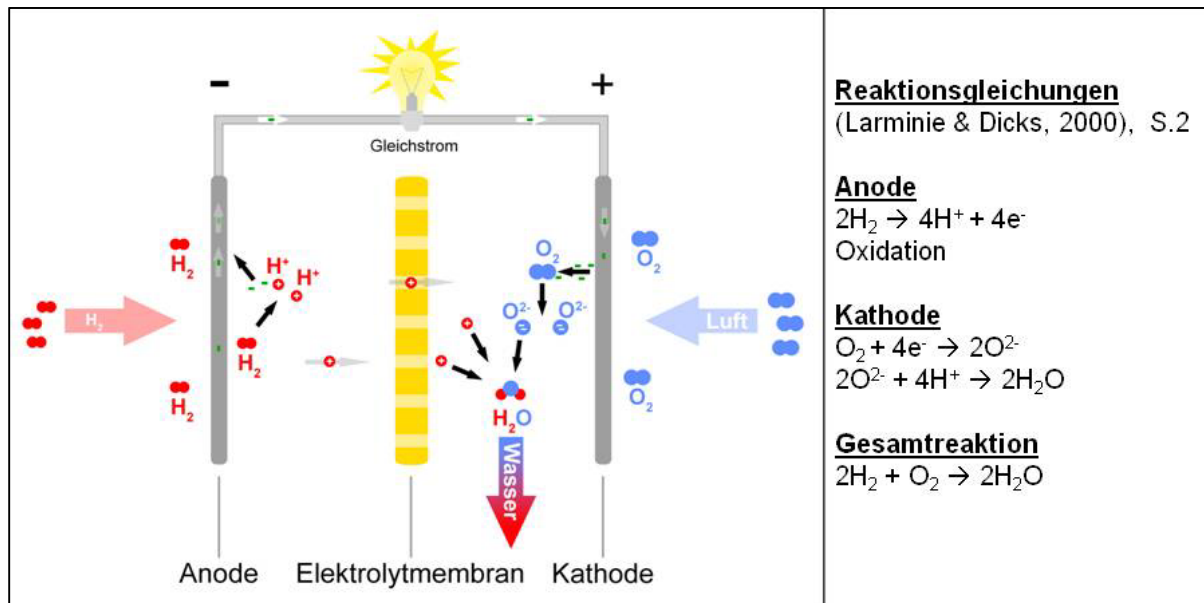


Abbildung 4: Energieliefernder Prozess der Brennstoffzelle²⁷

²⁶ (Kurzweil, 2003), S.73

²⁷ (Wikimedia Foundation Inc., 2011)

3 EINFÜHRUNG ZU SILICAGEL (KIESELGEL)

Da Silicagel hygroskopisch ist und gleichzeitig durch Erhitzen das hygroskopische Verhalten, nach der Aufnahme von Wasser, wieder hergestellt wird, eignet es sich zur Trocknung der Kathodenabluft einer Brennstoffzelle.

3.1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZU SILICAGEL

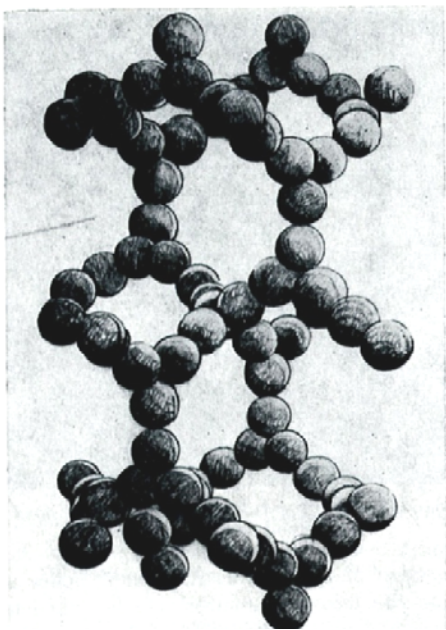


Abbildung 5: SiO₂-Ketten mit Koordinationszahl 3, Quelle: (Iler, 1955), S.123

Silicagel, als Siliziumdioxid, ist ein farb- und geruchloser Feststoff mit der Summenformel SiO₂ und der Strukturformel O=Si=O. Er ist nicht brennbar und praktisch unlöslich in Wasser²⁸. Silicagel ist ein starres 3-dimensionales Netzwerk von benachbarten SiO₂-Teilchen.²⁹ In Abbildung 5 ist eine SiO₂-Kette mit der Koordinationszahl 3 abgebildet. Die Koordinationszahl gibt die Anzahl von Nachbarmolekülen an, welches jedes SiO₂-Molekül hat. Sie hat Einfluss auf die Materialeigenschaften, wie das Oberflächenverhalten und die Packungsdichte des Materials. Die Koordinationszahl kann innerhalb des Gitters variieren und Werte von 2 bis 12 annehmen. Die Verkettung der Moleküle bestimmt die spezifische Oberfläche des Materials sowie die Größe der Poren und ihre Verteilung³⁰.

Silicagel ist hygroskopisch. Die hohe Adsorptionskapazität ist auf die mikroporöse Struktur und die ineinander greifenden Hohlräume (Poren) zurückzuführen. Dadurch werden große interne Oberflächen von bis zu 800m²/g gebildet. Wenn der Wasserdampfdruck in oder in der Nähe einer Pore niedriger ist als der Wasserdampfdruck der umgebenden Luft, diffundieren die Wasserdampfmoleküle an die Oberfläche des Silicagels, um dort anzuhaften. Ganz besonders an den Oberflächen der internen Poren findet die Adsorption statt. Je höher die Feuchte der Luft, umso mehr Feuchtigkeit wird adsorbiert.³¹ Bestimmte Formen von Silicagel können bis zu einem Drittel ihres Eigengewichts an Wasser aufnehmen.³² Die Adsorption des Wasserdampfs erfolgt exotherm, da während des Prozess der Aufnahme die Verdampfungsenthalpie ($\Delta H_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ ³³) frei wird. Ein chemischer Prozess findet bei der Adsorption nicht statt. Selbst wenn Silicagel mit Wasserdampf gesättigt ist, ist sein Erscheinungsbild unverändert. Die äußerliche Form verändert sich nicht und das Material ist nach wie vor trocken.³⁴

²⁸ (Gestis Stoffdatenbank, 2011)

²⁹ (Tschrüter, Daßler, Knölle, Herbst, & Wiesner, 2006)

³⁰ (Iler, 1955) S.127 f, S.129, S.132

³¹ (Sun & Besant, 2005) S.4953

³² (Sun & Besant, 2005) S.4962

³³ (Kuchling, 2001) S.630

³⁴ (Sun & Besant, 2005) S.4953

Der Großteil des physikalisch adsorbierten Wassers wird durch Trocknung mit heißer Luft bei 150 bis 200°C wieder desorbiert. Nur das Wasser im Material, welches als Silanol Gruppen an das Gel gebunden ist, desorbiert nicht³⁵.

Materialeigenschaften wie spezifische Oberfläche, Partikel- und Porengröße oder die Schichtdicke haben Einfluss auf das Adsorptions- bzw. Desorptionsverhalten des Materials. Je nach Herstellungsverfahren unterscheiden sich diese Attribute.³⁶ Ist die Schichtdicke des Materials klein, bei großer Partikelgröße, verbessert sich der Massen- und Wärmetransfer des Materials. Die Geschwindigkeit mit der Wasserdampf adsorbiert bzw. desorbiert wird steigt.³⁷ Nur die ersten 2mm einer Silicagel Schicht adsorbieren Wasserdampf. Schichten die tiefer liegen sind passiv und erhöhen den Energiebedarf bei der Regeneration.³⁸ Ein Silicagel mit kleiner Partikel- und Porengröße nimmt durch die vergrößerte spezifische Oberfläche mehr Feuchtigkeit pro Gewichtseinheit auf.³⁹ Die Energie, welche für die Desorption des Wassers aus dem Silicagel benötigt wird, verändert sich mit der Porengröße innerhalb des Materials. Der Bedarf an Desorptionsenergie steigt mit fallender Porengröße.⁴⁰

Das thermisch sehr stabile Silicagel zeigt nur in Verbindung mit Sauerstoffdifluorid (F_2O) Fluorwasserstoff (HF), Natrium (Na) (und Hitze) oder Xenonhexafluorid (XeF_6) gefährliche Reaktionen⁴¹. Da das Material bei der geplanten Anwendung nur mit Oxygen Depleted Air (die im Weiteren als ODA bezeichnete Kathodenabluft der Brennstoffzelle), Wasserdampf und Kleinstmengen Wasserstoff (ca.170ppm) in Berührung kommt, ist von einer Gefährdung nicht auszugehen.

³⁵ (Iler, 1955) S.128, S.144

³⁶ (Sun & Besant, 2005) S.4953

³⁷ (Chang, Chen, & Chung, 2005), S.2339

³⁸ (Niu & Zhang, 2002) S.265

³⁹ (Sun & Besant, 2005) S.4962; (Zhang & Niu, 2002), S.1360

⁴⁰ (Li, Li, Xia, & Xi, 2007) S.876

⁴¹ (Gestis Stoffdatenbank, 2011)

Eine Zusammenfassung der physikalischen und chemischen Eigenschaften kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 2: Physikalisch / chemische Eigenschaften von Silicagel⁴²

Name	Siliziumdioxid, Silicagel, Kieselgel
Summenformel / Strukturformel	SiO_2 / $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$
Farbe	weiß
Geruch	geruchlos
Aggregatzustand	fest bei 1013mbar und 20°C
Chem. Charakterisierung	nicht brennbar, praktisch unlöslich in Wasser, hygroskopisch
Molmasse	60,08g/mol
Schmelz- / Siedepunkt	1710°C / 2230°C
Dichte	2,65g/cm ³

⁴² (Gestis Stoffdatenbank, 2011)

Die bekannteste Herstellungsform sind Kügelchen, wie man es z.B. aus Umverpackungen von neuen Elektrogeräten als Feuchtigkeitsschutz kennt. Bei manchen Anwendungen wird zusätzlich ein meist blau- oder orangefarbener Indikator zugegeben, um anzuzeigen, wann die Trocknungskapazität des Materials ausgeschöpft ist. Die Kügelchen wechseln dann die Intensität der Farbe. Die in Abbildung 6 gezeigten Kügelchen würden zwischen hell- und dunkelblau variieren, was analog für den orangenen Indikator gilt. Die farblosen Kügelchen enthalten keinen Indikator.



Abbildung 6: Siliziumdioxid (Silicagel) als Kügelchen und Trocknungssäckchen⁴³

Für die in dieser Arbeit gefragten Eigenschaften kam eine Verwendung in der eben beschriebenen Form nicht in Frage. Die Form des in dieser Arbeit verwendeten Materials wird in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

⁴³ (Qindao Double Dragon Industry Co, Ltd., 2011)

3.2 HERSTELLUNG

Silicagel kommt in der Natur nur selten vor. Es tritt in hohlen Bambuspflanzen als Sekret in einer gelatineartigen Form auf. In dieser Form ist es als „tabashir“ bekannt. Außerdem ist Silicagel in der Natur noch in Opalabbaustätten zu finden⁴⁴.

Aufgrund der geringen natürlichen Vorkommen von Silicagel muss es für den industriellen Gebrauch synthetisch hergestellt werden. Es gibt verschiedenen Verfahren, welche in der Industrie zum Einsatz kommen. Hier soll nur ein Herstellungsverfahren in Kürze vorgestellt werden.

Die pyrotechnische Herstellung von SiO_2 aus Tetrachlorsilan (SiCl_4), auch Siliciumtetrachlorid genannt, ist im Wesentlichen eine kontinuierliche Flammenhydrolyse. Dadurch wird das Siliciumtetrachlorid bei ca. 1200°C in die Gasphase überführt, um in einer Wasserstoff-Sauerstoffflamme mit dem gebildeten Wasser spontan zum gewünschten Siliziumdioxid zu reagieren. Unter den genannten Bedingungen entstehen zunächst hochviskose Siliziumdioxid-Primärteilchen, die in der Größe von ca. 5-50nm variieren und eine glatte, nicht mikroporöse Oberfläche besitzen. In der Flamme verschmelzen diese Teilchen zu deutlich größeren Einheiten, auch Aggregate genannt, im Bereich von 100 – 500nm. Beim Abkühlen bilden sich aus diesen Aggregaten größere Tertiärstrukturen in Form von flockigen Agglomeraten. Diese Strukturen sind makroporös und führen zu relativ großen spezifischen Oberflächen von bis zu $600\text{m}^2/\text{g}$.⁴⁵

Ein weiteres, oft in der Industrie angewandtes Verfahren, ist die chemische Fällung von Alkalisilicaten mit Säuren im alkalischen Bereich, oder die Sol-Gel-Umwandlung von Alkalisilicaten mit Säuren im sauren Bereich.⁴⁶

⁴⁴ (Iler, 1955), S.128

⁴⁵ (Tschrötter, Daßler, Knölle, Herbst, & Wiesner, 2006)

⁴⁶ (Tschrötter, Daßler, Knölle, Herbst, & Wiesner, 2006)

4 ANFORDERUNGEN AN EIN INERTING SYSTEM

Die Anforderungen an ein Inertisierungssystem zur Inertisierung der Treibstofftanks richten sich nach dem Anforderungskatalog der Airbus Operations GmbH. Beschrieben sind diese im Airbus internen System Requirement Document (SRD) (Airbus Operations GmbH (SRD), 2010). Das SRD bezieht sich auf das Gesamtsystem, inklusive aller Subsysteme. Die Anforderungen für die einzelnen Subsysteme, wie z.B. die Trocknungseinheit, findet man in der Purchaser Technical Specification (PTS).⁴⁷

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Eckdaten herausgearbeitet. Es sind nicht alle in den Dokumenten aufgeführten Anforderungen enthalten, da sich viele der gestellten Aufgaben nicht auf einen Labor-Demonstrator, sondern auf ein im Flugzeug integriertes System beziehen. Alle Angaben sind der PTS entnommen.

Die essentielle Aufgabe eines Fuel Tank Inerting System (FTIS) ist es, die Zündfähigkeit innerhalb eines Flugzeugtanks unter eine definierte Grenze zu bringen. Dazu soll der Treibstofftank mit ODA versorgt werden. Dies dient dazu, die Bildung eines gefährlichen Kerosin-Luft-Gemisches zu verhindern. In der untenstehenden Auflistung finden sich die Anforderungen an das FTIS-Subsystem, Inert Gas Conditioning System (IGCS)

1. Das IGCS soll die ODA so konditionieren, dass nicht mehr als 100g Wasser während einer 500NM (nautic miles) design mission (siehe Abbildung 7) in den Tank eingetragen werden. Das entspricht einer absoluten Feuchte von $< 2 \text{ (g H}_2\text{O)/(kg ODA)}$ ⁴⁸ im Mittel der Zeit.
2. Das IGCS soll zwei ODA-Massenströme konditionieren können: high flow rate⁴⁹ von 25g ODA/s und eine low flow rate von 4g ODA/s.⁵⁰
3. Das IGCS soll ODA mit einer Sauerstoffkonzentration zwischen 10,1Vol.-% und 11,1Vol.-% konditionieren können.
4. Die Temperatur der ODA soll am Ausgang des IGCS maximal 80°C erreichen.
5. Das IGCS soll mit Versorgungsdrücken im Bereich von 0,7 bis 1,1bar(a) funktionieren.
6. Das IGCS soll normal funktionieren bei ODA Versorgungstemperaturen zwischen 0,7°C und 70°C.
7. Die Leistungsaufnahme des IGCS soll nicht über 500W liegen.
8. Mögliche Beiprodukte der Trocknung (Wasser, Wasserdampf, ODA, Luft) sollen bei Temperaturen von maximal 80°C ausgeleitet werden.

⁴⁷ (Airbus Operations GmbH (PTS), 2010)

⁴⁸ Im Folgenden wird die Einheit $\text{(g H}_2\text{O)/(kg ODA)}$ nur noch als g/kg geschrieben.

⁴⁹ (Enzinger, 2010), S.1

⁵⁰ Die Berechnungsgrundlage wird in Kapitel 6.6 Verwendete Formeln erläutert

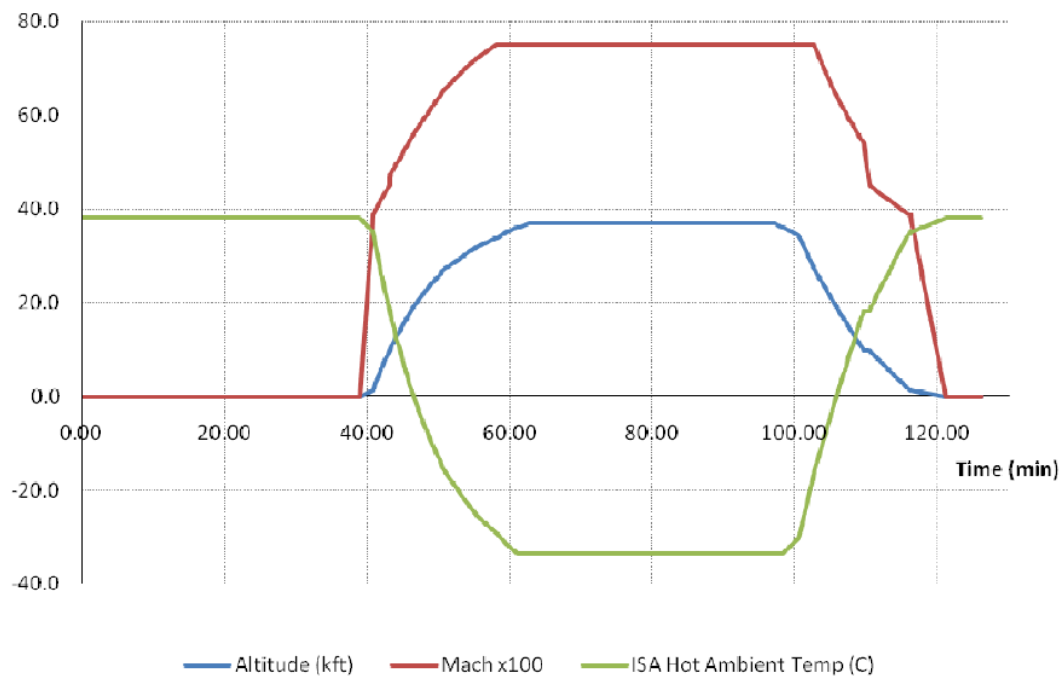


Abbildung 7: 500NM design mission⁵¹

⁵¹ (Airbus Operations GmbH (SRD), 2010)

5 BISHERIGE TECHNOLOGIEN

Das in dieser Thesis entwickelte Verfahren zur Konditionierung der ODA ist nicht der erste Versuch, die Kathodenabluft brauchbar zu machen. Deswegen wird in diesem Kapitel auf zwei dieser Verfahren eingegangen werden. Die Auseinandersetzung mit den beschriebenen Technologien fand nicht im Rahmen dieser Arbeit statt, diente aber als Inspiration für die Neuauslegung des Trocknungskonzepts.

5.1 ZONAL DRYER

Einer der bisherigen Versuche zur Trocknung der ODA zu Inertisierungszwecken war der von der Firma CTT Systems gelieferte und vom DLR leicht modifizierten Zonal Dryer (Abbildung 8). Die Modifikation bestand darin, dass die benötigte Luft für die Regeneration nicht aus der ODA entnommen, sondern extern, durch erhitzte Druckluft, zur Verfügung gestellt wird. Das von CTT Systems eingesetzte Element zur Trocknung ist ein Rotationskörper, bestehend aus Silicagel (SiO_2) und Glasfiber zur strukturellen Unterstützung in Honigwabenform. Es ist das gleiche Material, welches in dieser Arbeit zum Einsatz kommt (siehe 6.2.1).

Der Rotor ist durch Dichtungen auf der Stirnseite in 2 Teile ($\frac{1}{4}$ Regeneration, $\frac{3}{4}$ Trocknung) unterteilt. Der Regenerationsstrom wird elektrisch erhitzt. Der Rotor dreht sich permanent, um jeden Abschnitt des Rotors abwechselnd zur Trocknung zu verwenden und ihn anschließend zu regenerieren.⁵²

Die größte Schwierigkeit ist die Steuerung des Druckunterschieds der beiden Gasströme. Ist der Druckunterschied nicht in den geforderten Grenzen, ist eine Vermischung der beiden Luftströme nicht zu verhindern (Crossoverproblematik). Dies liegt an der Schwierigkeit, die Gasströme auf den rotierenden Stirnflächen des Rotors durch Dichtungen zu trennen. Es entstehen vorrangig Probleme beim Erreichen der gesteckten Sauerstoffkonzentrationsziele. Der geforderte Grenzwert für die Trockenheit des Gases wird erreicht.

Der übliche Einsatzbereich der Zonal Dryers liegt in der Konditionierung der Kabinenluft.

⁵² (CTT Systems, 2010), S.5 ff

ZONAL DRYER PRINCIPLE - P/N 2000-060

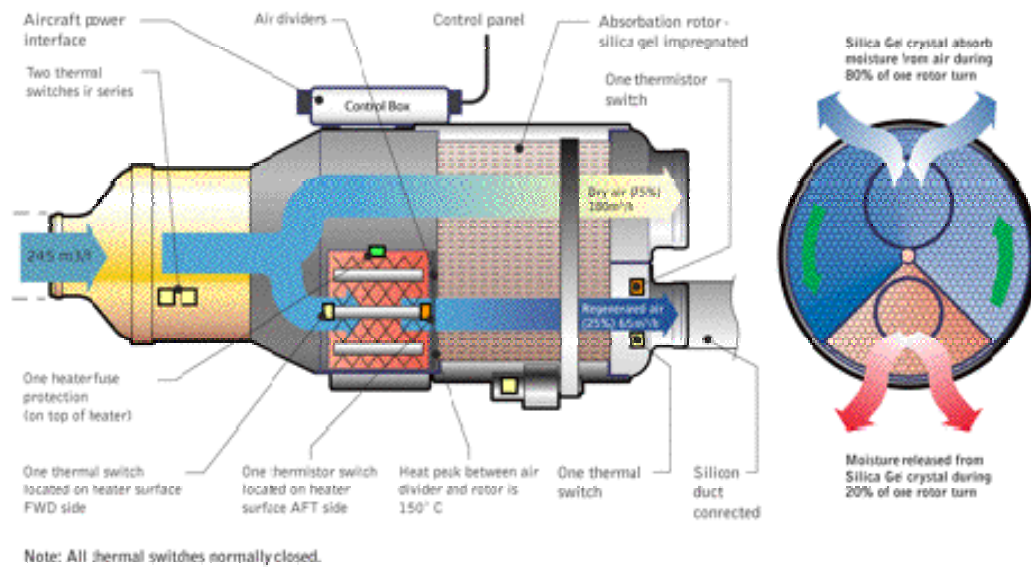


Abbildung 8: Zonal Dryer CTT Systems (CTT Systems)

5.2 ULTRADRYER

Das von der Firma Ultra Electronics Precision Air System (im Folgenden als Ultra bezeichnet) entwickelte Trocknungssystem basiert auf der Nutzung von Molekularsieben. Die von Ultra verwendeten Molekularsieve sind Zeolith-Aluminiumsilikate mit einer nanoporösen Struktur. Die Feuchte wird, wie bei der Nutzung von Silicagel, der ODA durch Adsorption entzogen. Die grundsätzliche Struktur unterscheidet sich nur wenig von dem in dieser Arbeit verwendeten Material. Bei dem von Ultra verwendeten Material wird die ursprüngliche Trocknungskapazität mittels Hitze wiederhergestellt.⁵³



Abbildung 9: Kohlefaserummantelte Molekularsiebfasern mit elektrischem Anschluss Quelle: (Ultra Electronics Precision Air Systems, 2010)

Im Falle des Ultradryers erfolgt die Regeneration nicht mit Hilfe einer externen Wärmequelle. Das pulverförmige Molekularsiebmaterial wird mit einem makroporösen Polymer gemischt. Aus dem entstehenden Werkstoff werden Hohlfasern extrudiert. Diese werden mit einer leitfähigen Kohlenstoffschicht überzogen. Die zu Bündeln zusammengefassten Fasern werden mit elektrischen Anschlüssen versehen (Abbildung 9). Zur Regeneration wird eine Spannung angelegt. Der fließende Strom erhitzt die Fasern, was den Desorptionsvorgang des adsorbierten Wassers auslöst.⁵⁴

Abbildung 10 zeigt die komplette Trocknungseinheit.

Dass der Betrieb des Ultradryers ohne zusätzliche Wärmequelle erfolgt, ist aus Sicht der Luftfahrt zu begrüßen, da dies Platz spart. Die Brennbarkeit des Kohlenstoffmantels der Hohlfasern ist aber ein Problem. Eine Zulassung für die Luftfahrt ist dadurch so gut wie ausgeschlossen.



Abbildung 10: Ultradryer

⁵³ (Ultra Electronics Precision Air Systems, 2010), S.40 ff

⁵⁴ (Ultra Electronics Precision Air Systems, 2010), S.40 ff

6 ONE STRING INERTING SYSTEM (OSIRIS)

Bei der Systemidee des One String Inerting System liegt der Fokus vor allem darauf, ein komplett unterdruckfähiges System zu konstruieren, was gleichzeitig neben dem gewünschten Produkt (ODA) keine Beiprodukte in Form von Wasser, Wasserdampf oder Luft liefert. Unterdruckfähig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es für die Funktion keinen Unterschied macht, ob das Medium durch die Anlage gedrückt oder gesaugt wird.

Auf Reishöhe (10 – 15km über dem Meeresspiegel) beträgt die Druckdifferenz zwischen Flugzeugkabine und Umgebung bis zu 500mbar. Ein Druckunterschied dieser Größe kann genutzt werden, um den Luftmassenstrom durch das System zu saugen. Die Arbeit eines Kompressors ist für den Betrieb der Anlage in diesem Fall nicht mehr nötig. Befindet sich das Flugzeug im Steig-/Sinkflug, oder ist es am Boden, muss wieder auf externe Kompressorarbeit zurückgegriffen werden, welche die Luft durch das System drückt. Die Funktion des Systems muss in beiden Betriebsarten gewährleistet sein.

6.1 AUSLEGUNG

In diesem Kapitel wird die Auslegung des Trockners dargestellt. Es wird auf die verfahrenstechnische Umsetzung und auf die Auswahl der Materialien eingegangen.

6.1.1 MATERIAL

Alle Bauteile innerhalb des Trocknungssystems müssen temperatur- und korrosionsbeständig sein. Diese Eigenschaften sind nötig, um den Bedingungen innerhalb der Anlage zu begegnen. Im Bereich des Heizers werden Temperaturen an der Außenhaut bis 300°C, im Inneren von über 500°C erreicht, was bei der thermischen Isolierung und dem Heizermaterial berücksichtigt werden muss. In der übrigen Anlage steigt die Temperatur nicht über 155°C.

Wegen relativen Feuchten von über 100% (flüssiges Wasser), müssen korrosionsbeständige Materialien verwendet werden. Dies ist wichtig, da das in der BZ produzierte Wasser ionenfrei und damit besonders aggressiv ist.

6.1.2 UNTERDRUCKFÄHIGKEIT / CROSSOVERPROBLEMATIK

Die in Kapitel 5.1 beschriebene Crossoverproblematik wird durch die absolute physikalische Trennung der beiden Medienströme (Regenerationsluft / ODA) gelöst. Abbildung 11 zeigt die getrennten Medienströme (Regenerationsluft rot, ODA grün). Eine Vermischung der beiden Medienströme, und die damit einhergehenden Verunreinigungen der ODA mit Sauerstoff und/oder Feuchtigkeit, sind nicht mehr möglich.

Um die Ströme vollkommen voneinander zu trennen, sind zwei Trocknereinheiten (im Weiteren nur als Einheit bezeichnet) eingeplant, wovon sich eine im Trocknungsbetrieb befindet, während die andere mittels heißer Luft regeneriert wird. Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, hat die Anlage insgesamt drei Einheiten. Die Notwendigkeit der dritten Einheit wird im nächsten Kapitel geklärt.

6.1.3 BEIPRODUKTE / MAXIMIERUNG DES WASSEROUTPUTS

Der Anforderungskatalog der Airbus Operations GmbH schreibt vor, dass mögliche Beiprodukte (Wasser, Wasserdampf, Luft, ODA) bei maximal 80°C ausgeleitet werden dürfen.⁵⁵ Durch die verfahrenstechnische Architektur als Einstrang (One String) werden Beiprodukte vollkommen vermieden. Abbildung 11 zeigt, dass die Luft, die zur Versorgung des elektrochemischen Prozess der BZ benötigt wird, erst zur Regeneration eines Trocknungselements verwendet wird. Durch diese verfahrenstechnische Einstrangarchitektur werden Beiprodukte vermieden: Es muss keine Temperaturobergrenze eingehalten werden.

Durch die Vermeidung von Beiprodukten kommt ein weiterer Effekt zum Tragen. Die Wassermenge, die bei Kondensation und Abscheidung der Kathodenabluft gewonnen wird, steigt

⁵⁵ (Airbus Operations GmbH (PTS), 2010)

um eben genau die Menge, die aus dem ODA-Strom bei der Trocknung entfernt wird. Dieser Zugewinn ist unabhängig von der Temperatur des Kondensators.

Das Einstrangdesign macht eine dritte Einheit erforderlich. Während der Umschaltung, von einer Einheit auf die nächste, darf der Luftstrom zu keiner Zeit unterbrochen oder zum Stocken gebracht werden. Durch die dritte Einheit wird die Umschaltung durchgeführt, ohne Einfluss auf den elektrochemischen Prozess der BZ zu nehmen. Der Umschaltvorgang wird in Kapitel 6.4 erläutert.

6.1.4 SILICAGELROTOREN

Für die Dimensionierung der Silicagelrotoren wurden folgende Anforderungen festgelegt:

1. Ein Rotor muss mindestens 5 Minuten die in Tabelle 3 angefragte Leistung erfüllen.
2. Der Durchmesser eines Rotors ist auf 160mm festgelegt.

Tabelle 3: Anforderungen an die Silicagelrotoren

Parameter	Eingang	Ausgang
Maximaler Massenstrom Trocknung und Regeneration	25g/s	25g/s
Temperatur	15°C	TBD
absolute Feuchte	10,5g/kg	< 2g/kg
Druck	~ Umgebungsdruck	~ Umgebungsdruck

Die Auslegung wurde von Firma Proflute übernommen. Mit den angegebenen Forderungen kam Proflute zu folgendem Ergebnis:

Parameter	Eingang	Ausgang
Temperatur Trocknung	15°C	47,2°C
Temperatur Regeneration	120°C	55,3°C
absolute Feuchte Trocknung	10,5g/kg	1,64g/kg
absolute Feuchte Regeneration	12g/kg	29,84g/kg

Die Rotoren haben einen Durchmesser von 160mm und eine Tiefe von 200mm. Die angegebene Regenerationstemperatur von 120°C steht nicht im Widerspruch zu der in Kapitel 3.1 angegebenen 150-200°C. Temperaturen in diesem Bereich werden nur für die Desorption des kompletten im Rotor befindlichen Wassers benötigt. Eine vollständige Desorption ist für den Betrieb im hier geforderten Parameterbereich nicht notwendig. Der Druckverlust eines Silcagelements wird mit < 79Pa angegeben.

6.1.5 WÄRMEQUELLE

Die Auslegung der Leistung (\dot{Q}) der Wärmequelle erfolgte über folgende Formel:

Formel 1: Wärmestrom

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \text{ [kW]}^{56}$$

\dot{m} = Massenfluß [kg/s]

c_p = Wärmekapazität bei konstantem Druck [kJ/kg K]

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

Die Auslegungsparameter sind:

Ausgangstemperatur = 10°C

Zieltemperatur = 160°C

\dot{m} = high flow = 0,025kg/s (siehe Kapitel 4 Punkt 2)

$c_{p\text{Luft}}$ = 1,005kJ/kg K (bei 20°C)⁵⁷

Daraus folgt:

$$\dot{Q} = (0,025 \times 1,005 \times (160 - 10))\text{kW} = 3,8\text{kW}$$

Das Ergebnis ist eine Näherung, da $c_{p\text{Luft}}$ sich mit steigender Temperatur ändert, und dient als Richtwert für die Auslegung des Heizers.

Um ausreichend Wärme zur Verfügung zu stellen, wird die Leistung auf 5,1kW festgelegt.

⁵⁶ (Kuchling, 2001), S. 250

⁵⁷ (Kuchling, 2001), S. 622

6.1.6 BELÜFTUNG DER TROCKNUNGSEINHEITEN

Der Wechsel einer Einheit vom Trocknungs- in den Regenerationsbetrieb, ohne vorherige Belüftung, führt zu einem Spannungsabfall und zur Sicherheitsabschaltung der BZ. Nach dem Trocknungsbetrieb ist die Einheit mit ODA (~ 11Vol.-% O₂) gefüllt. Wird diese ODA nach der Umschaltung in die BZ eingetragen, kommt der elektrochemische Prozess innerhalb der BZ (Abbildung 4, Seite 23) zum Erliegen.

Durch den Einbau der Ventile VK1 bis VK3 (siehe Abbildung 11) wird ein Störfall vermieden. Mit Hilfe dieser Ventile wird die ODA durch geeignete Ventilstellung abgeblasen. Im Falle einer Belüftung von Einheit 1 werden V4 und VK1 geöffnet während V1, V2 und V3 geschlossen sind. Das gilt analog für Einheit 2 und 3.

6.1.7 BYPASS

Eine Notwendigkeit für den kontinuierlichen Betrieb der Anlage ist, dass die Regeneration eines Trocknungskörpers beendet ist, bevor die Trocknungskapazität der trocknenden Einheit erreicht ist. Ist dies nicht der Fall, würde die Trocknungseinheit irgendwann „geflutet“ sein und könnte die Trocknung nicht weiter aufrechterhalten. Da nach Beendigung eines Regenerationsprozesses die Temperatur am Ausgang der regenerierenden Einheit, und damit am Kathodeneingang der BZ stark ansteigt, ist es notwendig, einen Bypass (gelbe Leitung in Abbildung 11) mit zugehörigen Ventil (VBP) einzufügen. Ist die Regeneration abgeschlossen, wird die BZ durch den Bypass versorgt.

Ein Ausschalten des Heizers reicht nicht aus, um die Temperatur zu begrenzen. Durch die große Wärmekapazität von Heizer und Verrohrung würde der Luftstrom auch bei ausgeschaltetem Heizer weiter stark erhitzt. Selbst bei einer Heizkonstruktion, die nach Abschaltung sofort aufhört die durchgeführte Luft zu erhitzen, ist ein Bypass notwendig. Würde nach der Regeneration normale Umgebungsluft durch die Trocknungselemente geführt, würde diese die Zuluft stark trocknen. Dies wäre zum einen negativ für die BZ, die mit trockener Luft beliefert würde, zum anderen würde die Aufnahmekapazität der Einheit für den nächsten Trocknungsvorgang reduziert.

6.1.8 MEDIENFLUSS DURCH DAS SYSTEM

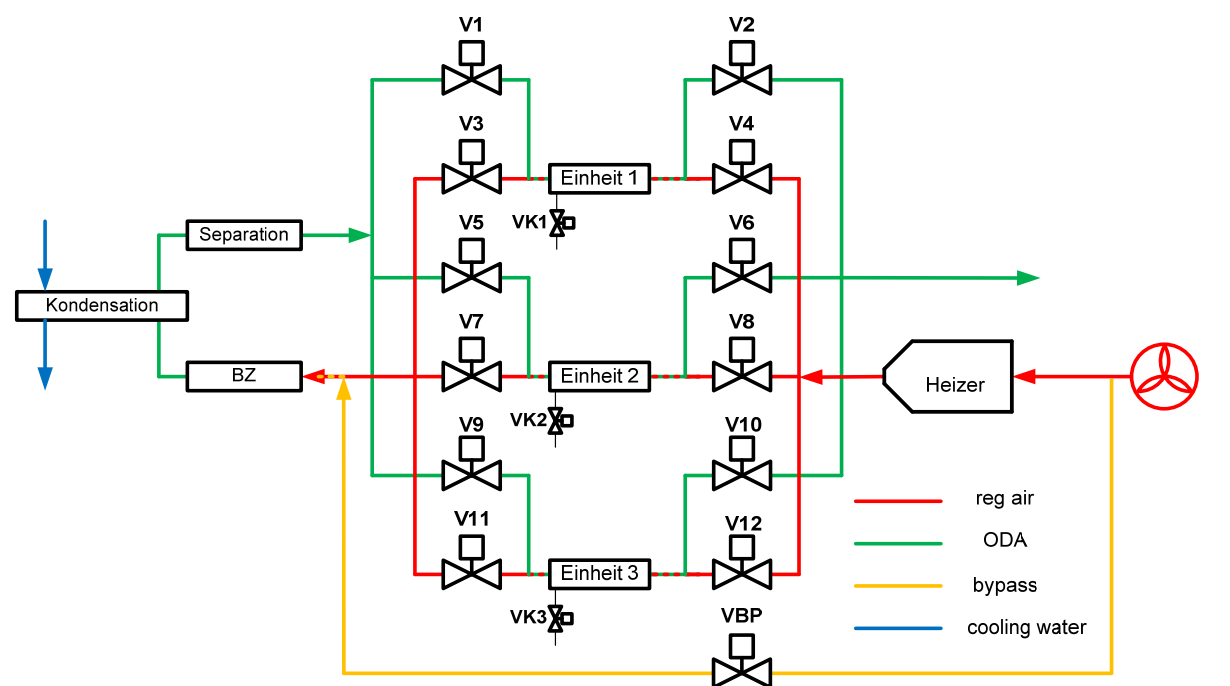


Abbildung 11: Fließbild OSIRIS Gesamtaufbau

6.2 KOMPONENTEN / VERWENDETE MATERIALIEN

6.2.1 TROCKNUNGSKÖRPER / SILICAGELWABEN



Abbildung 12: Silicagel Rotor Proflute

Seit Jahrzehnten sind diese, auch als Enthalphieräder bezeichneten, Silicagelrotoren in Energierückgewinnungssystemen sowie in der Luftentfeuchtung im Einsatz.⁵⁸

Die Trocknungskörper, welche die Trocknung der ODA mittels Adsorption übernehmen, sind das Herzstück von OSIrS. Hergestellt werden die Körper von der Firma Proflute aus Schweden.

Von der Bauart gleichen diese Rotoren denen, die in Kapitel 5.1 beschrieben werden.

Die in Wabenform gefertigten Strukturen bestehen zu 82% aus Silicagel. Weitere 16% Glasfiber stellen die Festigkeit des Materials sicher (siehe Abbildung 14). Die übrigen 2% sind eine Oberflächenbeschich-

tung aus Acryl, die dem Schutz des Materials dient. Das Material hat eine Dichte von 230kg/m^3 bei einer Wärmekapazität von $c_p = 0,85\text{kJ/kg K}$.

Wie reines Silicagel, ist auch der Verbundwerkstoff aus Glasfiber und Silicagel nicht brennbar. Das Material ist nach ASTM E 84 getestet und erreicht einen Flamindex von 0 bei einer Rauchentwicklung von 0.

Das Material ist in der Lage bis zu 40% seines Eigengewichts in Form von Wasser aus einer feuchten Umgebung aufzunehmen. Allerdings muss das Material vor flüssigem Wasser geschützt werden.⁵⁹

Die Aufnahmekapazität von Silicagel ist stark von der relativen Feuchte der Umgebung abhängig (siehe Kapitel 3.1). Abbildung 13 zeigt den prozentualen Gewichtszuwachs des Materials in Abhängigkeit von der relativen Feuchte.

⁵⁸ (Ruvio, Costa, & Figueiredo, 2007), S.4823

⁵⁹ (Proflute, 2011), S.1 ff

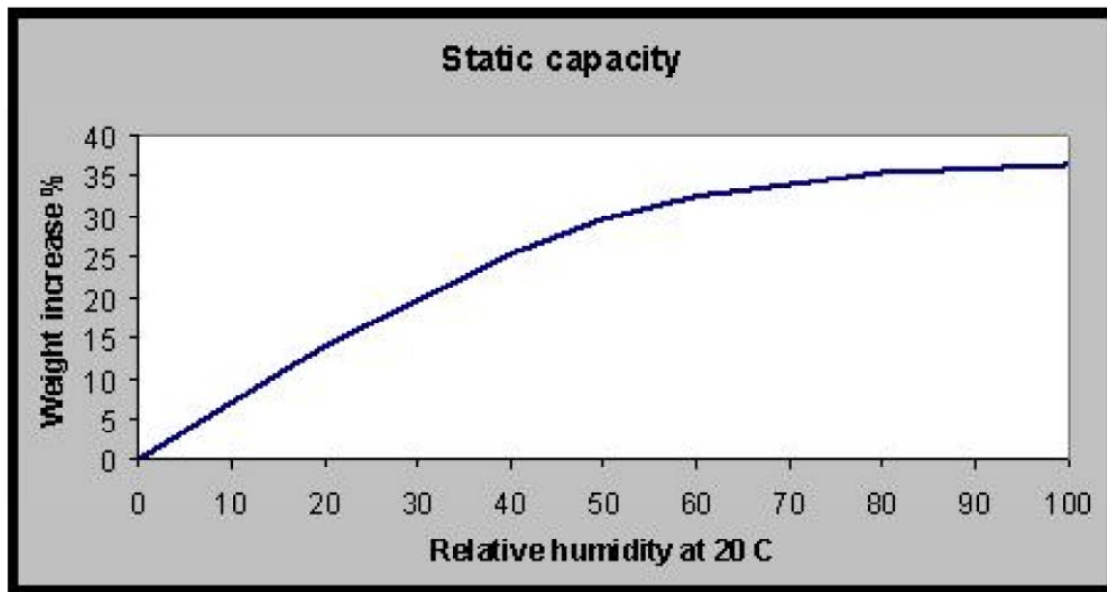


Abbildung 13: Aufnahmeverhalten in Abhängigkeit von rel. Feuchte der Silicagelrotoren⁶⁰

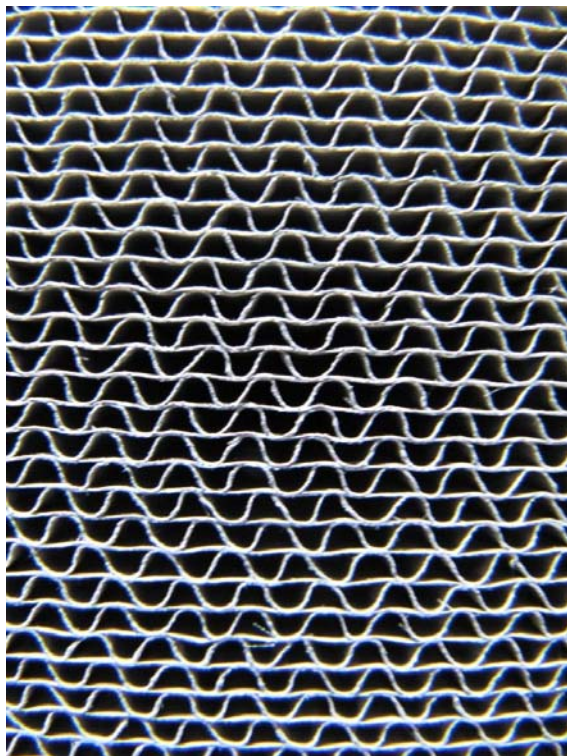


Abbildung 14: Nahaufnahme der Silicagelrotorenstruktur

⁶⁰ (Proflute)

6.2.2 BRENNSTOFFZELLE / KONDENSATION / ABSCHIEDUNG

Das verwendete Brennstoffzellensystem der kanadischen Firma Hydrogenics ist mit einem Niedertemperatur PEM-Stack ausgestattet. Die folgende Tabelle enthält die Leistungsdaten des Systems.

Tabelle 4: Leistungsdaten FC Hydrogenics⁶¹

Model Specification	Hy PM XR 12
Anzahl Zellen [-]	60
Max. Leistung [kW]	12,5
Spannungsbereich [V_{dc}]	30 - 60
Maximaler Betriebsstrom [A]	350
Spitzenwirkungsgrad netto [%]	53

Abbildung 36 im Anhang zeigt den BZ-Stack angeschlossen an den Trockner.

Der als Kondensator verwendete Plattenwärmetauscher ist vom Typ AlfaNova 27-34 der Firma AlfaLaval (siehe Abbildung 38 im Anhang). Der Wärmetauscher ist aus Edelstahl gefertigt. Bei einer Plattenzahl von 34 hat er eine Wärmeübertragungsfläche von $0,8\text{m}^2$.⁶²

Für die Abscheidung der Wassertropfen aus dem Luftstrom wird ein Zyklonabscheider der Firma Mankenberg verwendet (siehe Abbildung 39 im Anhang). Dieser schützt die Silicagelkörper vor flüssigem Wasser, welches im Kondensator auskondensiert wird. Der Zyklon ist aus Edelstahl gefertigt. Mankenberg garantiert einen Abscheidegrad von 98%.⁶³

⁶¹ (Hydrogenics, 2010)

⁶² (AlfaLaval, 2006)

⁶³ (Mankenberg)

6.2.3 KARTUSCHEN

Als Behälter für die in Kapitel 6.2.1 gezeigten Trocknungswaben dienen Kartuschen aus Polyvinylidenfluorid (PVDF). Die Schmelztemperatur von PVDF liegt bei 178°C⁶⁴, was für die maximale Temperatur von 155°C innerhalb des Systems ausreicht.

Jede Kartusche hat fünf Zugänge mit 1/4" BSP-Innengewinde, durch welche Sensoren eingeführt werden können. Für diese Arbeit ist allerdings nur jeweils ein Thermoelement an Aus- und Eingang der Kartuschen eingeschraubt (siehe Kapitel 6.3). Die Ein- und Ausgänge sind mit einem 2" BSP-Innengewinde versehen, in welche die Verrohrung direkt eingeschraubt wird. (siehe Abbildung 37 im Anhang).

6.2.4 VERROHRUNG

Die Verrohrung ist von der Firma Linnemann GmbH in Tübingen gefertigt. Beim Material handelt es sich um Edelstahl AISI 304 mit einem Rohrendurchmesser von 2".

Verbunden sind die Rohre durch eine Klemmringverschraubung nach DIN 32676 (siehe Abbildung 40 im Anhang). Die Klemmringverschraubung hat gute Dichtigkeitseigenschaften und ist durch die verwendete EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) Dichtung trotzdem etwas flexibel. So werden Verspannungen im Aufbau gering gehalten. Der Auf- und Abbau der Anlage ist durch den Einsatz der DIN 32676 Verbinder, bei guter Zugänglichkeit, einfach und schnell durchzuführen.

An Übergängen, an denen keine Möglichkeit besteht DIN 32676 Verbinder zu nutzen, werden 2" BSP Gewinde benutzt. Dies ist z.B. bei den Übergängen zu den Kartuschen sowie zu den Ventilen nötig.

6.2.5 VENTILE

Zu Regelung der Medienflüsse werden 2" Pneumatik-Kugelhähne eingesetzt (siehe Abbildung 41 im Anhang). Die Kugelhähne sind aus Edelstahl mit PTFE Dichtungen. Lieferant ist die Firma HTK Hamburg. Dieser Kugelhähntyp entspricht mit seiner kompakten Bauweise und seiner Temperaturbeständigkeit den Anforderungen. Elektrisch betriebene Kugelhähne kommen nicht zum Einsatz. Sie sind zu preisintensiv und nur durch voluminöse Aufbauten zum Temperaturschutz der Elektronik temperaturbeständig. Die verwendeten Kugelhähne sind für einen Temperaturbereich von -30 bis +180°C zugelassen.

Gesteuert werden die Kugelhähne über zusätzliche 5/2 Magnetventile der Firma Joyner Pneumatic vom Typ Namur MNH510701. Die Öffnungs- bzw. Schließgeschwindigkeit wird mit einstellbaren Schalldämpfern aus Sinterbronze jeweils an den Druckluftausgängen der Namur-Ventile eingestellt. An den Schalldämpfern wird mittels einer Einstellschraube die Fließgeschwindigkeit der ausströmenden Druckluft geregelt. Aus den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten resultieren unterschiedliche Schaltgeschwindigkeiten der Kugelhäh-

⁶⁴ (Datenblatt PVDF Jurima GmbH)

ne. Ein Kugelhahn mit Steuerventil und Schalldämpfern ist auf Abbildung 41 im Anhang zu finden.

Für die in Kapitel 6.1.6 beschriebene Belüftung der Kartuschen werden einfache 1/8“ Magnetventile der Firma ODE OFFICINE DI ESINO LARIO S.R.L. vom Typ MV1324G verwendet (Abbildung 42 im Anhang).

6.2.6 HEIZER



Abbildung 15: Heizerkonstruktion aus Edelstahl

Die Auslegung des Heizers erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma HTK Hamburg. Das runde Gehäuse (Abbildung 16) ist aus Edelstahl gefertigt und hat einen Durchmesser von 400mm. Es ist an einem Ende verschlossen und mit drei G1 1/2“ Gewinde-Einlässen versehen. Das andere Ende verjüngt sich konisch auf 2“ Innendurchmesser und ist der Ausgang des Heizers. Der Eingang befindet sich auf der verschlossenen Seite und ist im rechten Winkel zur Laufrichtung angebracht. Ein- und Ausgänge sind mit 2“ BSP Innengewinden versehen.

Die durch die drei Einlässe eingeführten elektrischen Einschraubheizkörper (Abbildung 43 und Abbildung 44 im Anhang) sind von der Firma Carlo Loysch aus Österreich geliefert. Bei einer Betriebsspannung von maximal 400V_{ac} geben die Heizkörper jeweils 1,7kW Heizleistung ab. Es steht insgesamt eine Leistung von 5,1kW zur Verfügung.

Die Stromversorgung der Heizstäbe wird über eine Thyristorschaltung mit einem Thyro-A der Firma AEG Power Solutions sichergestellt (siehe Abbildung 47 im Anhang).

Da an der Außenhaut Temperaturen bis 300°C auftreten, wird der gesamte Heizer mit dem Isolationsmaterial BCTEX der Firma Horst GmbH umhüllt. Die Isolierung toleriert eine zulässige Höchsttemperatur von 1000°C. Der

Heizer in eingebauter Form und mit eingeschraubten Heizelementen ist auf Abbildung 43 im Anhang zu sehen.

Abbildung 17 zeigt das System in der Seitenansicht. Es sind Heizer mit angeschlossenem Gebläse, Bypass (Kunststoffschlauch) sowie der Trocknungseinheit 1 mit Ventilen zu sehen.

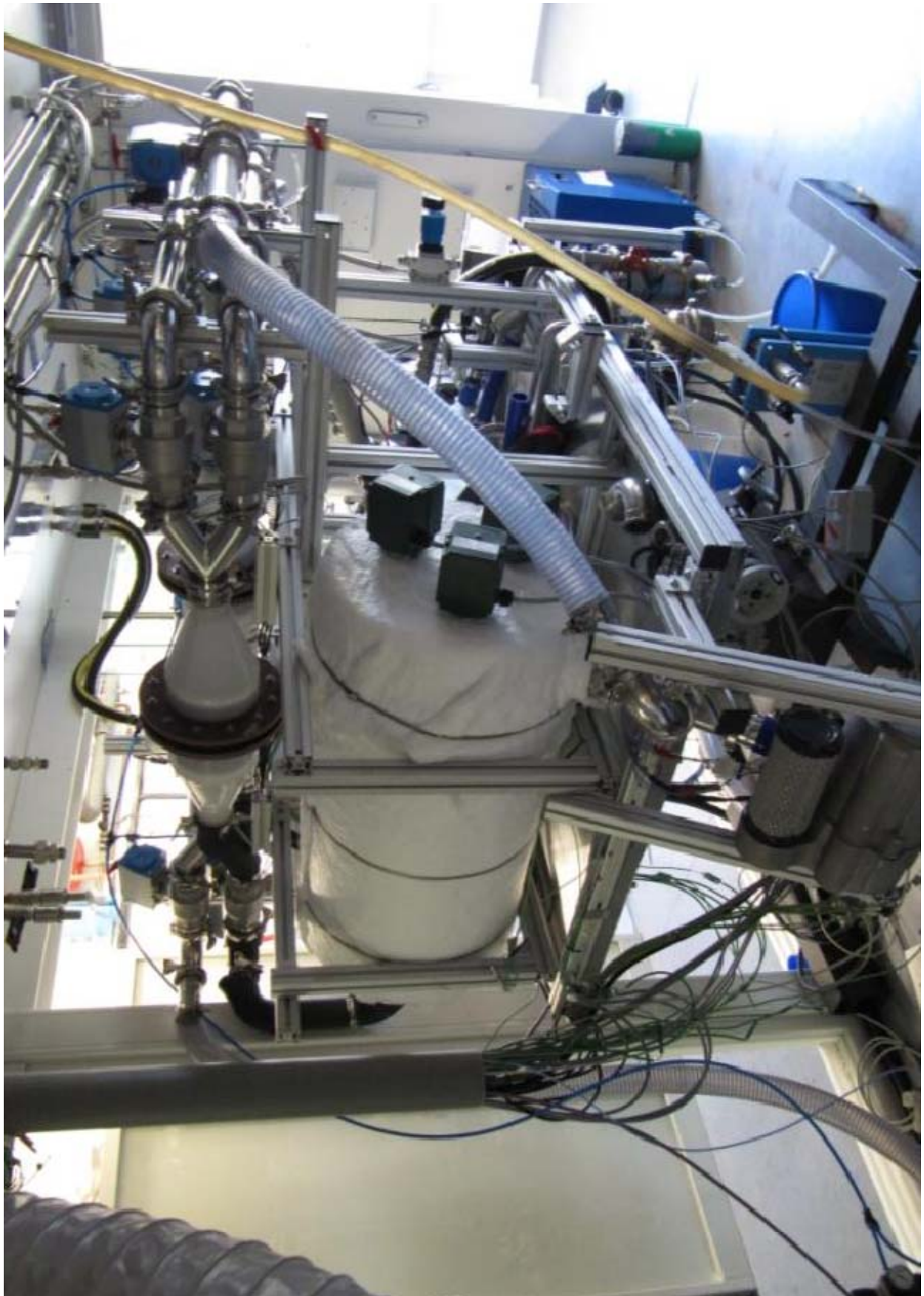


Abbildung 16: Aufbau OSIRIS

6.3 INSTRUMENTIERUNG / SENSOREN

Insgesamt sind an der Anlage 30 Sensoren angebracht und weitere 5 Werte werden aus gelieferten Daten der Sensoren errechnet. Tabelle 19 im Anhang listet alle Werte auf, die aufgezeichnet werden. Abbildung 17 und Abbildung 49 in Anhang zeigt die Positionen der Sensoren und der berechneten Werte innerhalb des Aufbaus. Die in der Zeichnung mit ACE_x_ beschrifteten Blöcke sind Messbänke, in denen jeweils Temperatur, Druck, O₂-Konzentration sowie relative Feuchte gemessen werden (siehe Abbildung 45 im Anhang).

Ein Beispiel: Die relative Feuchte am Eingang der Brennstoffzelle steht in den Datensätzen unter ACE_1_4_RelFeuchte. Die Temperatur am Ausgang des Gesamtsystems findet man in den Datensätzen unter ACE_5_1_Temp. Die absoluten Feuchten stehen in den Datensätzen unter OSIrIS_x1 bis OSIrIS_x4.

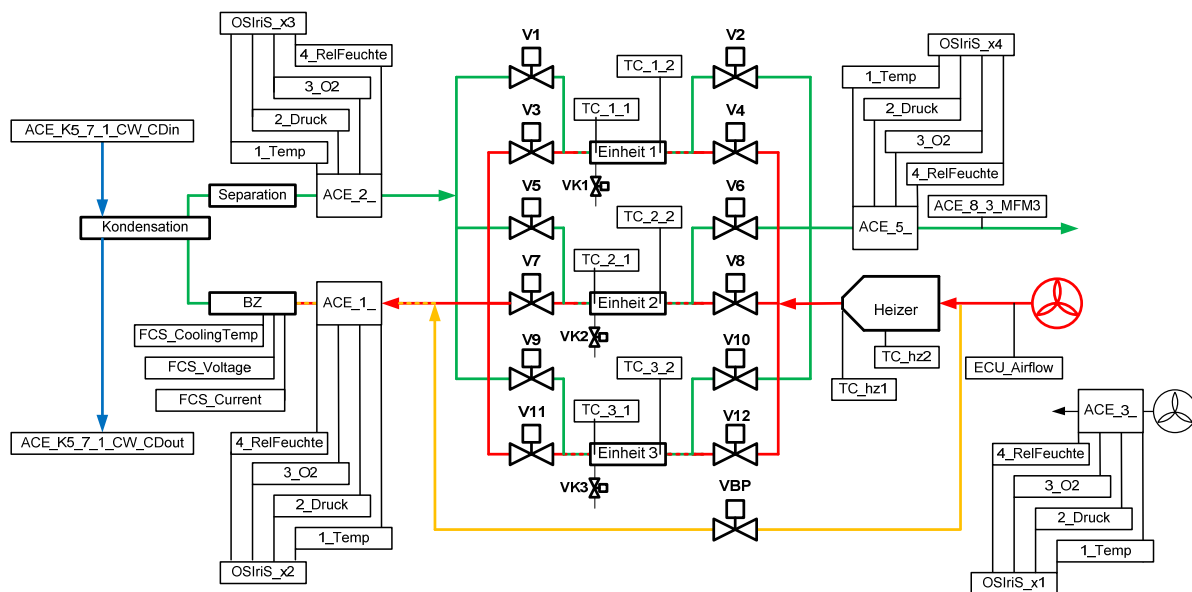


Abbildung 17: Positionen der Sensoren

6.4 PROGRAMMIERUNG (SOFTWARE)

Die Steuerungssoftware ist mit Matlab und Matlab Simulink erstellt. Im Anhang finden sich ein Abdruck der wichtigen Programmteile sowie eine Abbildung des GUI (graphical user interface), über das die Software kontrolliert wird. In den folgenden Kapiteln wird immer wieder Bezug zu den Abbildungen im Anhang hergestellt. Wenn im Folgenden von Bild x die Rede ist, bezieht es sich auf die Bilder in Kapitel 9.3 im Anhang.

Die Steuerung läuft über einen Industrie PC vom Typ PIP10 (siehe Abbildung 46 im Anhang) der Firma MPL. Die Kommunikation von Steuerrechner und Anlage wird über ein CAN Bus System realisiert, welches mit der X67 Baureihe von B&R Automation aufgebaut ist (siehe Abbildung 47 im Anhang).

Dieser Arbeit sind Tabelle 7, Tabelle 8 und Abbildung 17 in laminierten Form beigelegt. Um den Beschreibungen der Programmierung zu folgen, können diese zur Hand genommen werden.

6.4.1 HEIZERSTEUERUNG

Die Heizersteuerung ist in Kapitel 9.3 auf Bild 1 zu sehen. Je nachdem, welche der Einheiten gerade regeneriert wird, ändert sich der Sensor, auf dessen Wert geregelt wird. Befindet sich Einheit 1 in der Regeneration, wird der Wert von TC1_2 (siehe Abbildung 17 Seite 46) als Regelwert verwendet. Analog gilt das für Einheit 2 / TC2_2 und Einheit 3 / TC3_2. Der Baustein „Multiswitchport Switch 1“ (Markierung 1) gibt, je nachdem in welchem Status sich das System befindet, den entsprechenden Temperaturwert weiter. Die Differenz zwischen dem Setpoint und der aktuellen Temperatur wird an einen PID Controller weiter gegeben, welcher den Regelwert errechnet.

Im Subsystem „Sicherheit“ (Bild 1, Markierung 2) sind die Sicherheitsparameter hinterlegt. Bild 2 zeigt diese Sicherheitsparameter. Es sind 6 Schutzmechanismen eingebaut. Sollte eine oder mehrere der angegebenen Bedingungen zutreffen, wird die Stromversorgung des Heizers automatisch unterbrochen.

Tabelle 5: Sicherheitswerte Heizer

Parameter	Beschreibung	Bedingung
OSIriS_T_out	Temperatur am Ausgang der regenerierenden Einheit	> 90°C
TC_hz1 TC_hz2	Temperatur an der Außenhaut des Heizers unter der Isolierung	> 250°C
OSIriS_VBP	Regelwert für den Kugelhahn im Bypass (binär)	== 1 (offen)
OSIRIS_Status_aktuell	Status des Systems. Während den Umschaltungen wird der Wert 0 gezeigt	== 0
FCS_Current	Strom den die BZ Momentan liefert	< 5A

6.4.2 VENTILSTEUERUNG

Bild 3 zeigt einen Überblick über die Steuerung aller 16 im System befindlichen Ventile. Jede Einheit durchläuft während des Betriebes 4 Phasen (Tabelle 6).

Tabelle 6: Phasen OSiriS

Phase	Beschreibung
dry	Die Einheit trocknet den ODA Strom
reg	Die Einheit wird regeneriert
rest	Die Einheit befindet sich im Ruhezustand
purge	Die Einheit wird mit Luft gespült

Die Einstellung des Systems beruht auf den zwei Regelgrößen **Status** und **Position**. Die Variable **Position** nimmt Werte von 1 bis 15 an. Jeder Wert entspricht einer spezifischen Stellung aller im System befindlichen Ventile. In Tabelle 7 sind diese Stellungen angegeben. In der Programmierung sind die Positionen mit den zugehörigen Werten in Arrays hinterlegt, welche bei Bedarf abgerufen werden (Bild 3 Markierung 2).

Insgesamt sechs **Positionen** sind bestimmten **Status** Werten zugeordnet. Diese sechs **Status** Werte sind in Tabelle 8 aufgeführt, zusammen mit den Phasen in denen sich die Einheiten jeweils befinden.

Status 11, 22 und 33 sind die Sonderfälle, in denen die Regeneration abgeschlossen ist. In diesen Fällen wird die Brennstoffzelle vom Gebläse, über das geöffnete Ventil VBP (gelb in Abbildung 17) mit Luft versorgt. Status 11 unterscheidet sich von Status 1 darin, dass Einheit 2 nicht mehr regeneriert wird, sondern in der Ruhephase ist (siehe Tabelle 8). Analog gilt das für Status 22 und 2 bzw. Status 33 und 3. Die Umschaltung in Position 13, 14 oder 15 (Status 11, 22, 33) erfolgt automatisch, wenn die Temperatur am Ausgang der regenerierenden Einheit auf $> 100^{\circ}\text{C}$ steigt.

Die **Positionen** 3, 7 und 11 werden für die Belüftung (purge) der mit ODA gefüllten Einheit geschaltet, bevor diese in die Regeneration geht. Die Belüftung verhindert, dass die in der Einheit verbleibende ODA in die BZ eingetragen wird und eine Störung hervorruft. Im Falle von Position 3 sind V4, V7, V8, V9, V10 und VK1 geöffnet, wodurch Einheit 3 trocknet, Einheit 2 regeneriert und Einheit 1 belüftet wird, bevor sie in die Regeneration geht.

Tabelle 7: Stellungen Ventile binär (1 = offen; 0 = geschlossen)

Position	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	VK1	VK2	VK3	VBP
1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
8	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
10	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
11	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
12	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
13	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle 8: Übersicht Positionen und Phasen OSIRIS

Position	Status	Einheit 1				Einheit 2				Einheit 3			
		dry	reg	rest	purge	dry	reg	rest	purge	dry	reg	rest	purge
1	1	x					x					x	
2	-	x					x			x			
3	-				x		x			x			
4	-		x				x			x			
5	2		x					x		x			
6	-		x			x				x			
7	-		x			x							x
8	-		x			x					x		
9	3			x		x					x		
10	-	x				x					x		
11	-	x							x		x		
12	-	x					x				x		
13	11	x						x				x	
14	22			x				x		x			
15	33			x			x					x	

Zentrale Aufgabe der Ventilsteuerung ist es, die Umschaltung von einem in den nächsten Status durchzuführen, ohne den laufenden Betrieb der Anlage zu stören. Jede Umschaltung läuft in 4 Schritten ab. Anhand der Umschaltung von Status 2 zu Status 3 soll veranschaulicht werden, wie dies umgesetzt ist (vgl. Tabelle 7, Tabelle 8, Abbildung 17).

Zum Ende von Status 2 befindet sich die Anlage in Position 5. Die Umschaltung beginnt mit einem Wechsel in Position 6. In Position 6 sind Einheit 2 und Einheit 3 gleichzeitig auf Seiten der ODA geöffnet. Dadurch wird die Blockierung der ODA während der Umschaltung vermieden. Nach 5s folgt Position 7. Damit ist die Umschaltung der ODA Seite schon abgeschlossen, da Einheit 2 mit voller Trocknungskapazität alleine die Trocknung übernimmt. In Position 7 findet zusätzlich die Belüftung von Einheit 3 statt. Während V9 und V10 geschlossen werden, öffnen sich V12 und VK3. Durch Abblasen der aus dem vorangegangenen Trocknungsbetrieb stammenden ODA aus Einheit 3 wird die Vorbereitung für die kommende Regeneration von Einheit 3 durchgeführt. Position 7 wird 800s gehalten, um ein Abblasen aller in der Einheit befindlichen ODA sicherzustellen.

Die folgende Position 8 unterscheidet sich von Position 7 nur darin, dass VK3 wieder geschlossen und V11 geöffnet wird. Einheit 1 und Einheit 3 befinden sich für kurze Zeit gleichzeitig in der Regeneration, um eine Blockade der Luftversorgung während der Umschaltung zu vermeiden. Als letzter Schritt folgt der Wechsel zu Position 9, in der Einheit 3 regeneriert und Einheit 2 trocknet. Die Umschaltung zu Status 3 ist damit abgeschlossen.

Befindet sich die Anlage zum Ende des Zyklus in Status 22, und nicht in Status 2, hat das für die Umschaltung keine weiteren Folgen. Die Umschaltung erfolgt in gleicher Reihenfolge und unterscheidet sich nur von der Ausgangsposition (Position 14 anstatt 5).

In der Programmierung sind diese Positionsreihenfolgen in Arrays hinterlegt und werden je nach Bedarf aufgerufen und durchgeführt. Dafür vergleicht die Programmierung den aktuellen Status mit dem nächstfolgenden (siehe Bild 3 Markierung 1). Der aktuelle Status wird durch die Stellung der Ventile ermittelt. Dies wird von dem in Markierung 5 auf Bild 3 gezeigten Subsystem übernommen. Die zugehörigen Ventilstellungen werden im Positionsgeber ermittelt (siehe Bild 3 Markierung 2). Die Positionen sind in Arrays hinterlegt. Die Zeit, welche für die jeweiligen Schritte benötigt wird, sind im Subsystem „Zeit und Positionsgeber Statuswechsel“ hinterlegt (Bild 3 Markierung 3), welches in den gewünschten Zeitabständen die aktuelle Position weitergibt. Dies ist nötig, da z.B. die Belüftung, welche bei den Positionen 3, 7 und 11 durchgeführt wird, im Gegensatz zu den anderen Schaltvorgängen, mehr Zeit benötigt (siehe Bild 7 Markierung 2). Die automatische Umschaltung in den Bypass erfolgt, wenn der Statuswechsel zum neuen Status abgeschlossen ist und die Temperatur am Ausgang der regenerierenden Einheit 100°C überschritten hat. Die Bedingung ist in der Programmierung in Bild 3 Markierung 3 hinterlegt und in Bild 7 Markierung 1 zu sehen.

Die folgende Tabelle zeigt die jeweilige Reihenfolge von Positionen für die Umschaltung (siehe auch Bild 6 Markierung 1).

Tabelle 9: Umschaltsschritte OSIrS

Ausgangsstatus	Position	Zielstatus	Position	Schaltreihenfolge in Positionen
1	1	2	5	2 → 3 → 4 → 5
2	5	3	9	6 → 7 → 8 → 9
3	9	1	1	10 → 11 → 12 → 1
11	13	2	5	2 → 3 → 4 → 5
22	14	3	9	6 → 7 → 8 → 9
33	15	1	1	10 → 11 → 12 → 1

Um ein Überhitzen der BZ oder der Trocknungseinheiten zu verhindern, ist zusätzlich eine Sicherheitsabfrage eingebaut (siehe Bild 3 Markierung 4). Sollte eine der vier Sicherheitsbedingungen erfüllt sein, schließt die Steuerung automatisch alle 16 Ventile. Die folgende Tabelle zeigt die Sicherheitswerte und deren Bedeutung.

Tabelle 10: Sicherheitswerte für Überhitzungsschutz der BZ

Parameter	Beschreibung	Bedingung
T_11	Temperatur direkt am Kathodeneingang der BZ	> 70°C
TC1_2 TC2_2 TC3_2	Jeweils die Temperatur am Regenerationseingang der Einheiten. Diese Bedingung kann nur erfüllt sein, wenn sich die Einheit in der Regeneration befindet.	> 160°C

6.4.3 BERECHNUNG DER ABSOLUTEN FEUCHTE

Um jederzeit genau über Zustände der Einheiten informiert zu sein, ist die Berechnung der absoluten Feuchte in der Programmierung enthalten. Bild 9 zeigt die Berechnung der 4 Werte OSIrIS_x1 bis OSIrIS_x4, alle in g/kg. Die Bilder 10 bis 13 zeigen, wie die Berechnung der Werte im Einzelnen umgesetzt ist. Die Berechnung wird insgesamt 4-mal durchgeführt (Subsysteme: sh_ambient / sh_fc_in / sh_OSIrIS_in / sh_OSIrIS_out in Bild 9). Als Bild nur einmal am Beispiel sh_ambient (Bild 9 Markierung 1) auf Bild 10 bis 13 dargestellt. Alle vier Werte werden in Echtzeit während des Betriebes aus den gemessenen Werten der Sensoren errechnet. Die mathematische Grundlage wird in Kapitel 6.6 behandelt.

6.5 PASS/FAIL KRITERIEN

In Kapitel 4 werden die Anforderungen der Airbus Operations GmbH an ein Inerting System stellen beschrieben. Daraus ergeben sich folgende Grenzwerte:

Inertisierung

O₂-Konzentration < 11,1Vol.-%

Trocknung

spec. humidity < 2g/kg im Mittel über die Zeit (Δt = Versuchszeit)

Die O₂-Konzentration wird durch einen Sensor gemessen. Die spec. humidity hingegen wird aus den Sensorwerten Temperatur (ACE_5_1_Temp), Druck (ACE_5_2_Druck), O₂-Konzentration (ACE_5_3_O2), und relative Feuchte (ACE_5_4_RelFeuchte)) berechnet. Die zugrunde gelegten Formeln finden sich in Kapitel 6.6. Gekennzeichnet werden die erfolgreichen Messungen mit **pass**, die nicht erfolgreichen mit **fail**.

6.6 VERWENDETE FORMELN

Die hier aufgeführten Formeln sind alle einem internen Memorandum der Airbus Operations GmbH entnommen⁶⁵. Das Dokument dient dazu, dass alle Abteilungen, welche sich mit dem Thema ODA beschäftigen, die gleiche Berechnungsgrundlage verwenden. Da die Entwicklungsarbeit in diesem Projekt eng an die Vorgaben von Airbus geknüpft ist, erfolgen die nachstehenden Berechnungen gemäß diesem internen Memorandum.

Tabelle 11: Molare Massen⁶⁶

Element	Molare Masse
Nitrogen / Stickstoff	28g/mol
Oxygen / Sauerstoff	32g/mol
Water / Wasser	18g/mol

Die folgende Magnus Formel zur Bestimmung von p_{sat} bezieht sich auf den Temperaturbereich -30°C bis 70°C:

Formel 2: Magnus Formel

$$p_{\text{sat}} = 611,213 \times e^{\frac{17,5043 \times T}{241,2 + T}}$$

T = Temperatur [°C]

p_{sat} = Sättigungsdampfdruck (Magnus Formel) [Pa]

Die Molare Masse der ODA berechnet sich wie folgt:

Formel 3: Molare Masse ODA

$$M_{\text{ODA}} = \frac{M_{\text{O}_2} \times [\text{O}_2]}{100} + M_{\text{N}_2} \times \left(1 - \frac{[\text{O}_2]}{100}\right)$$

$[\text{O}_2]$ = O₂-Konzentration [Vol.-%]

M_x = molare Masse des Elements X [g/mol]

⁶⁵ (Renouard-Vallet, 2010), S.1 ff

⁶⁶ (Renouard-Vallet, 2010), S.1

Die absolute Feuchte der ODA ergibt sich aus folgender Formel:

Formel 4: absolute Feuchte ODA

$$spec. humidity = 1000 \times \left(\frac{\frac{M_{water}}{M_{ODA}} \times \frac{\varphi}{100} \times p_{sat}}{p - \left(1 - \frac{M_{water}}{M_{ODA}} \right) \times \frac{\varphi}{100} \times p_{sat}} \right)$$

M_x = molare Masse des Elements X [g/mol]

φ = relative Feuchte [%]

p_{sat} = Sättigungsdampfdruck (Magnus Formel) [Pa]

p = Druck [Pa]

Charakterisierung der Massenflüsse / Charakteristik der Brennstoffzelle

Formel 5: Massenfluss trockene Luft

$$\dot{m}_{airdry} = 3,57 \times 10^{-7} \times \lambda \times n \times I \text{ [kg/s]}$$

Formel 6: Massenfluss trockene ODA

$$\dot{m}_{ODAdry} = (3,57 \times 10^{-7} \times \lambda - 8,29 \times 10^{-8}) \times n \times I \text{ [kg/s]}$$

Formel 7: Wasserproduktion

$$water_production = 9,34 \times 10^{-8} \times n \times I \text{ [kg/s]}$$

Für Formel 5 bis Formel 7 gilt:

λ = Stöchiometrie der BZ [-]⁶⁷

n = Anzahl der Zellen im Stack [-]

I = Strom [A]

⁶⁷ Der Wert λ wird auch als Luftüberschusszahl bezeichnet. Er gibt an, in welchem Verhältnis Sauerstoff und Wasserstoff bei der Reaktion innerhalb der BZ zur Verfügung stehen. Ein Lambdawert von 2 bedeutet also, dass doppelt so viel Sauerstoff der Kathode zugeführt wird, als für die Reaktion ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$) benötigt wird.

6.7 VERSUCHSREIHEN UND AUSWERTUNG

Im Folgenden werden 4 Versuchsreihen beschrieben. Untersucht wird der Einfluss von Kondensatortemperatur (vary condensation temperature VCT), Regenerationstemperatur (vary regeneration temperature VRT), unterschiedlichen Beladungsgeschwindigkeiten (vary moisture loading VML) und Druckunterschieden am Ausgang des Systems (vary environmental pressure VEP) auf das Verhalten des Gesamtsystems.

In Tabelle 12 sind die Parameter beschrieben, welche in den Testreihen variiert wurden.

Tabelle 12: Testparameter für Versuchsreihen

Parameter	Beschreibung / Messwert
Typ	Typ der Versuchsreihe
Strom [A]	Arithmetisches Mittel des (Δt = Versuchszeit) Stroms, den die Zelle an die elektronischen Lasten abgibt / FCS_Current
Cd Cooling Temp [°C]	Arithmetisches Mittel (Δt = Versuchszeit) der Temperatur am Kühlwassereingang des Kondensators / ACE_K5_8_1_Cd_CWin
RegTemp [°C]	Temperatur im Eingang der regenerierenden Einheit / TC1_2, TC2_2, TC3_2
atm-x [mbar]	Relativer Druck am Ausgang des Systems / ACE_5_2_Druck

In Tabelle 13 sind die einzelnen Versuche sowie deren Bewertung nach den pass/fail Kriterien zu finden. Die Versuchsreihe zur Unterdruckfähigkeit (VEP) wurden nicht durchgeführt. Grund dafür ist, dass die Anlage zur Bereitstellung des Unterdrucks zum Zeitpunkt der Testläufe nicht zur Verfügung stand.

Doppelmessungen der Messreihe VCT ergaben eine Abweichung von max. 3,6% im arithmetischen Mittel der absoluten Feuchte am Ausgang (OSIriS_x4). Die weiteren Versuche sind aus diesem Grund nicht mit Doppelmessungen verifiziert. Da die spec. humidity der zentrale Parameter ist, fiel die Entscheidung, mehr Einzelmessungen zu machen, um damit einen größeren Betriebsbereich abbilden zu können.

Tabelle 13: Versuchsmatrix statische Vermessung

Nr.	Typ	Strom [A]	Cd Cooling Temp [°C]	RegTemp [°C]	atm-x [mbar]	Zeit [s]	Inertisierung pass/fail	Trocknung pass/fail
1	VCT	150	6,5	120	0	7200	pass	pass
2	VCT	150	10	120	0	7200	pass	pass
3	VCT	150	15	120	0	7200	fail	pass
4	VCT	150	20	120	0	3600	pass	fail
5	VRT	150	10	100	0	7200	pass	pass
6	VRT	150	10	110	0	7200	fail	pass
7	VRT	150	10	120	0	7200	pass	pass
8	VRT	150	10	130	0	7200	fail	pass
9	VML	100	10	120	0	7200	fail	pass
10	VML	150	10	120	0	7200	fail	pass
11	VML	200	10	120	0	7200	fail	pass
12	VEP	150	10	120	0	7200	n.d.	n.d.
13	VEP	150	10	120	200	7200	n.d.	n.d.
14	VEP	150	10	120	400	7200	n.d.	n.d.
15	VEP	150	10	120	600	7200	n.d.	n.d.

Erläuterung: n.d. = nicht durchgeführt

Beispielhaft für alle Messungen zeigt Abbildung 18 den Verlauf von absoluter Feuchte und O₂-Konzentration am Ausgang des Gesamtsystems (siehe Abbildung 17, Messblock ACE_5). Die Peaks, welche im Verlauf der absoluten Feuchte zu sehen sind, rühren von den Umschaltungen des Systems her. Die Umschaltung von einem in den nächsten Status wurde manuell durchgeführt, wenn die absolute Feuchte am Ausgang (OSIriS_x2) den Wert von 2g/kg überschritten hatte.

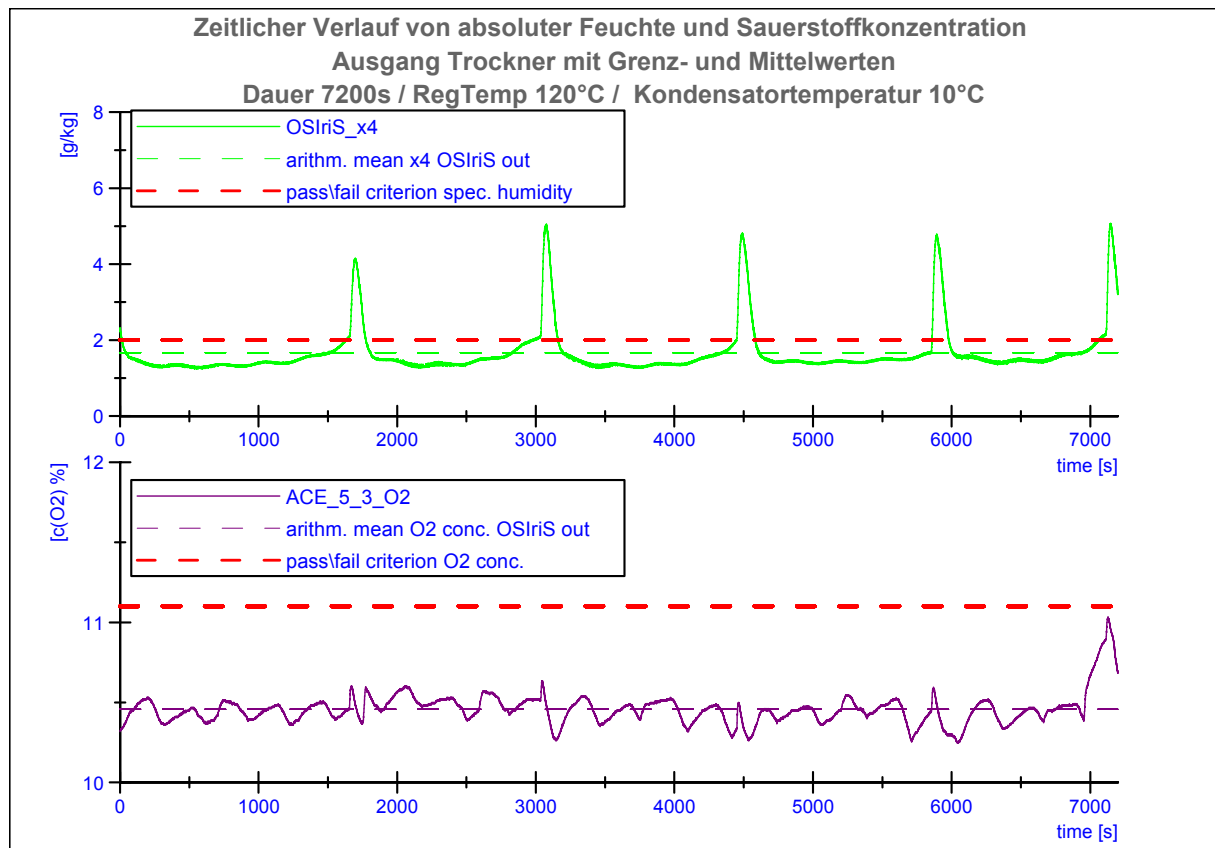


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf von absoluter Feuchte und O₂-Konzentration mit Grenzwerten

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf die O₂-Konzentration nur qualitativ eingegangen. Dies hat zwei Gründe:

1. Zu Beginn der Testphase waren durch einen ungünstigen Aufbau Aus- und Eingang des Systems räumlich nicht weit genug voneinander getrennt, wodurch die ausströmende ODA Einfluss auf den O₂-Gehalt in der Eingangsluft genommen hat und damit wiederum auf die Ausgangskonzentration. Behoben ist dieser Umstand ab Versuch Nr. 6. In den Versuchen wird ab diesem Zeitpunkt in nur einem Fall das O₂-Kriterium erreicht.
2. Die zur Verfügung stehenden O₂-Sensoren hatten den Kalibrierzyklus deutlich überschritten. Es wurden ab und an nicht plausible Werte angezeigt. So wurde die Konzentration im Raum, bei nicht laufenden Anlagen, mit 19,9Vol.-% anstatt 20,9Vol.-% angegeben. Da die Abweichung nicht konstant war, konnte das Problem nicht mit einem Offset auf den Messwert behoben werden.

Abbildung 19 zeigt beispielhaft den Verlauf der Temperatur in der ODA am Ausgang des Gesamtsystems. In allen Messungen blieb die Temperatur am Ausgang unter 45°C, womit die Forderung, dass die ODA am Ausgang des IGCS nie heißer als 80°C soll, erfüllt ist.

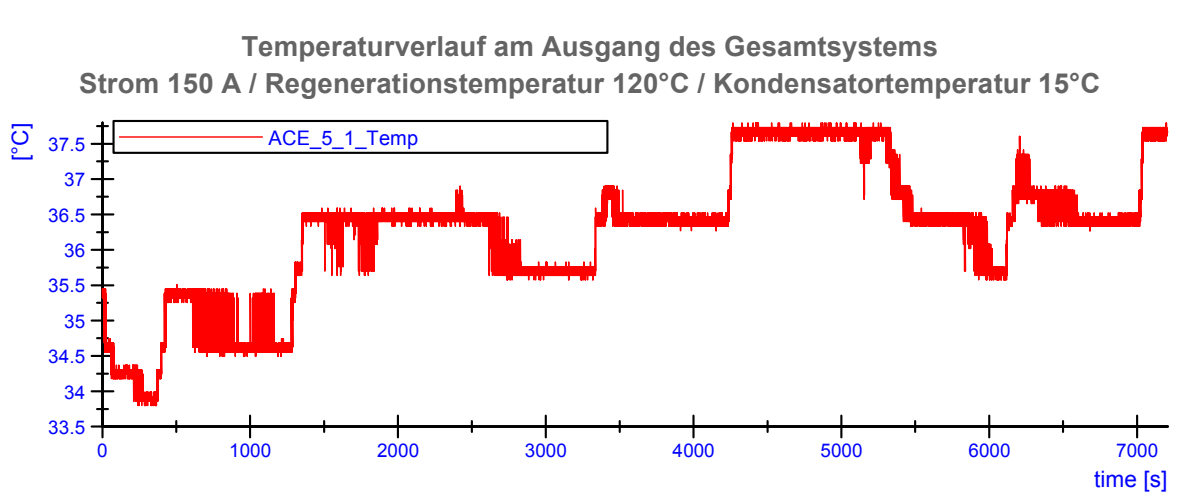


Abbildung 19: Temperaturverlauf Ausgang Gesamtsystem

Mit $I = 150\text{A}$, $\lambda = 1,8$ und $n = 60$ Zellen ergibt nach Formel 6, dass in allen Messungen außer Nr.5 low flow (4g/s) erreicht wird.

$$\dot{m} = (3,57 \times 10^{-7} \times 1,8 - 8,29 \times 10^{-8}) \times 60 \times 150 \times 1000 = 5\text{g/s}$$

Versuche bei denen high flow (25g/s) erreicht wird, sind nicht durchgeführt worden. Die dazu nötige Brennstoffzellenkapazität stand nicht zur Verfügung. Dennoch ist der Trockner auf die Trocknung von 25g/s ausgelegt.

Vor der Beschreibung der statischen Vermessung der Gesamtanlage wird auf die einzelnen Phasen (dry, reg, rest) eingegangen, in welchen sich die Einheiten befinden können. Als Beispiel dient immer Einheit 1 (siehe Abbildung 11, Seite 39). Die BZ wird mit einem Strom (ECU_Current) von 150A (~6kW), der Kondensator mit einer Temperatur (ACE_K5_8_1_Cd_CWin) von 10°C am Kühlwassereingang und der Heizer mit einer Regenerationstemperatur (TC1_2 / TC2_2 / TC3_2) von 120°C betrieben.

In zwei weiteren Abschnitten werden der Umschaltvorgang sowie die zusätzlichen Belastungen für die BZ beschrieben.

Für Auswertung der Daten und Erstellung von Diagrammen wurde DIAdem der Firma National Instrument verwendet.

6.7.1 TROCKNUNGSPROZESS (DRY)

Abbildung 20 zeigt den Verlauf der absoluten Feuchten sowie der Temperaturen an Eingang (TC1_1 / OSIrIS_x3) und Ausgang (TC1_2 / OSIrIS_x4) von Einheit 1. Der zeitliche Verlauf der absoluten Feuchte am Eingang ist annähernd sinusförmig, was wiederum auf das Schwingungsverhalten des Kondensators unter dem Einfluss des Kühlaggregats zurückzuführen ist. Diese Schwingung hat keinen Einfluss auf das Ergebnis am Ausgang. Am Ausgang ist zu sehen, dass die absolute Feuchte zu Beginn der Trocknungsphase um $\sim 2,1\text{g/kg}$ über dem angestrebten Wert von 2g/kg liegt aber innerhalb von $\sim 50\text{s}$ unter diesen fällt. Dies hängt damit zusammen, dass die Temperatur der Silicagelwabe sowie die Kartusche durch den vorangegangenen Regenerationsprozess (reg) bei $\sim 75^\circ\text{C}$ liegt. Die Einheit hat sich in der Ruhephase (rest) um $\sim 45\text{K}$ abgekühlt. Wegen der Temperatur, welche die Einheit hat, ist die volle Trocknungskapazität anfangs noch nicht verfügbar (siehe: Abhängigkeit von relativer Feuchte in 3.1).

Die Trocknungsleistung steigt im gleichen Maße wie die Temperatur am Ausgang (TC1_2) fällt, was auf die Abhängigkeit von relativer Feuchte und Adsorptionsfähigkeit hinweist ($3100 - 3200\text{s}$). Beim Eintritt in die Einheit erhitzt sich die ODA wodurch die relative Feuchte fällt und so den Gradienten zwischen Silicagel und ODA verringert.

Zu Beginn der Trocknung ($3100 - 3200\text{s}$) verringert sich die Temperatur am Ausgang (TC1_2) stärker als im weiteren Verlauf. Der Grund dafür ist, dass anfangs die ODA den Trocknungskörper kühlt, ohne dass dabei viel Feuchte von dem Trocknungsmaterial aufgenommen wird. Im weiteren Verlauf wird der ODA immer mehr Feuchte entzogen und dabei auch eine größere Menge an Adsorptionswärme frei.⁶⁸ Deswegen verlangsamt sich der Abkühlvorgang deutlich. Zwischen 3400s und 4500s ist bei der Ausgangstemperatur (TC1_2) ein sinusähnliches Schwingverhalten zu sehen. Die Maxima treten dabei zeitlich um ca. 110s nach den Maxima der absoluten Feuchte am Eingang (OSIrIS_x3) auf. Durch die zyklisch steigende und fallende Belastung mit Wasserdampf wird bei der Trocknung, mit kurzem Zeitabstand, mehr bzw. weniger Adsorptionswärme frei, was das Schwingverhalten der Temperatur auslöst. Die zeitliche Verzögerung wird durch den Abstand von ca. $2,5\text{m}$ Rohrlänge verstärkt.

⁶⁸ (Niu & Zhang, 2002), S.264

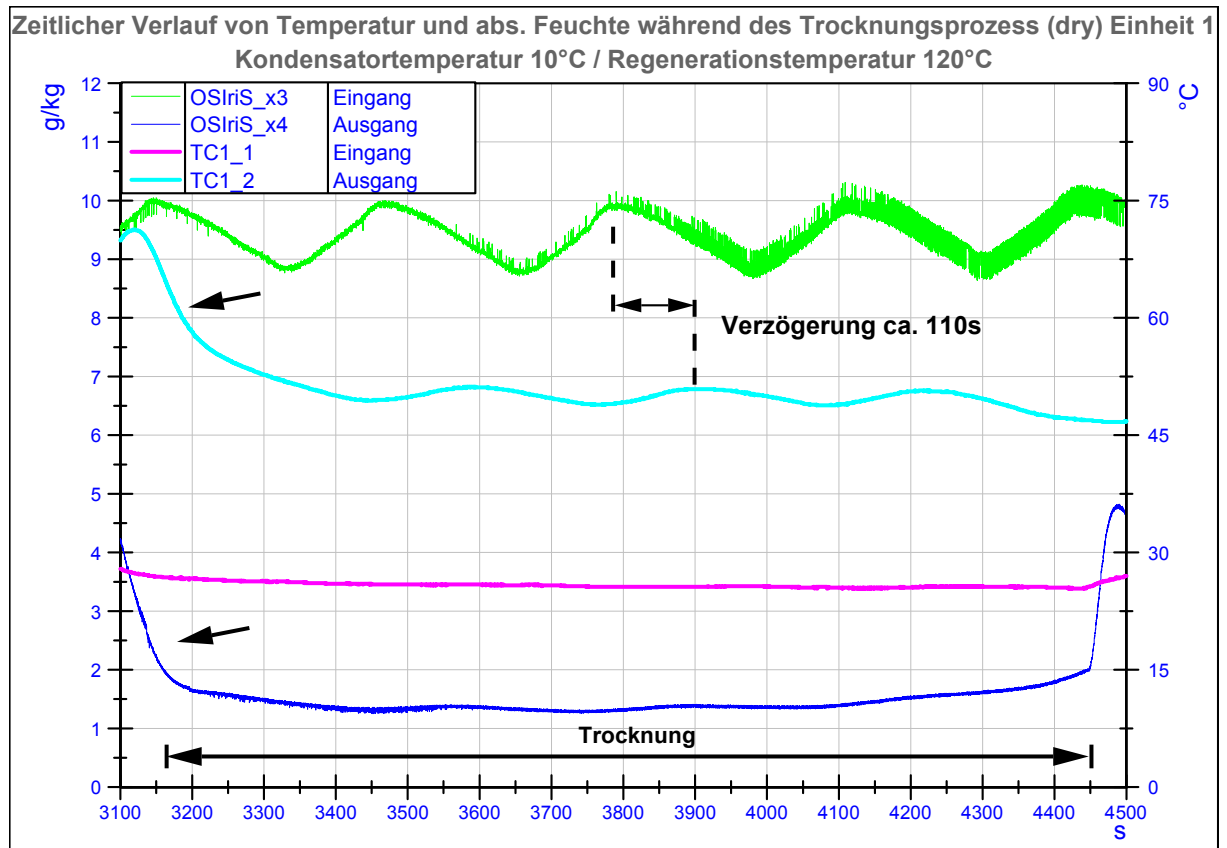


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf Trocknungsphase (dry) Einheit 1

6.7.2 REGENERATIONPROZESS (REG)

Abbildung 21 zeigt die Regenerationsphase, welche sich zeitlich direkt an die im vorherigen Kapitel beschriebene Trocknungsphase anschließt. Durch den Wechsel von der Trocknungs- in die Regenerationsphase hat sich die Fließrichtung innerhalb der Einheit verändert. TC1_2 und OSIrS_x1 zeigen Temperatur und absolute Feuchte am Eingang von Einheit 1, TC1_1 und OSIrS_x2 die Werte am Ausgang.

Die Temperatur am Eingang der Einheit (TC1_2) steigt innerhalb von 300s nach der Umschaltung bis auf $\sim 125^{\circ}\text{C}$. Mit einem Zeitversatz von $\sim 75\text{s}$ steigt die absolute Feuchte am Ausgang (OSIrS_x2) steil, von $\sim 7\text{g/kg}$ auf 25g/kg , an. Gleichzeitig steigt die Temperatur am Ausgang (TC1_1) $\sim 28^{\circ}\text{C}$ auf $\sim 40^{\circ}\text{C}$.

Am Verlauf von TC1_1 am Ausgang ist der Fortschritt der Regeneration abzulesen. Der starke Anstieg gegen Ende der Phase fällt mit dem Sinken der absoluten Feuchte am Ausgang der Einheit zusammen. Dieser Verlauf ist bei allen Regenerationsvorgängen gleich ausgeprägt. Aus diesem Grund ist die Temperatur am Ausgang als Markierung ausgewählt, um die Regeneration für beendet zu erklären und die Umschaltung in den Bypass vorzunehmen (siehe 6.4.2).

Der Vergleich von Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigt, dass die Regeneration der Einheit ca. 600s in Anspruch nimmt, während eine Trocknung für ca. 1300s möglich ist. Dies ist eine Voraussetzung um einen dauerhaften Betrieb der Anlage garantieren zu können. Übersteigt die Regenerationszeit die Trocknungszeit, kommt der Trocknungsprozess zum Erliegen. Die Anlage kann das aufgenommene Wasser aus den Silicagel-Elementen, in der zur Verfügung stehenden Zeit, nicht vollständig desorbieren und wird dadurch „geflutet“. Die Einhaltung dieses Zeitunterschieds ist bei der Auslegung in Kapitel 6.1.7 gefordert und ist hiermit erfüllt.

Die Anlage muss zukünftig mit high flow (25 (g ODA) / s) betrieben werden können. Das Verhältnis von Regenerations- zu Trocknungszeit ändert sich dadurch nicht. Durch den größeren ODA-Massenstrom steigt die Wasserlast für den Trockner, wodurch sich die Trocknungszeit verkürzt. Gleichzeitig steigt der Massenzstrom an Luft, der zur Regeneration verwendet wird und damit die Leistung die vom Heizer in die Einheit eingetragen wird (vgl. siehe Formel 1 Seite 37). Der größere Energieeintrag verringert die Regenerationszeit im gleichen Maße wie die Trocknungszeit.

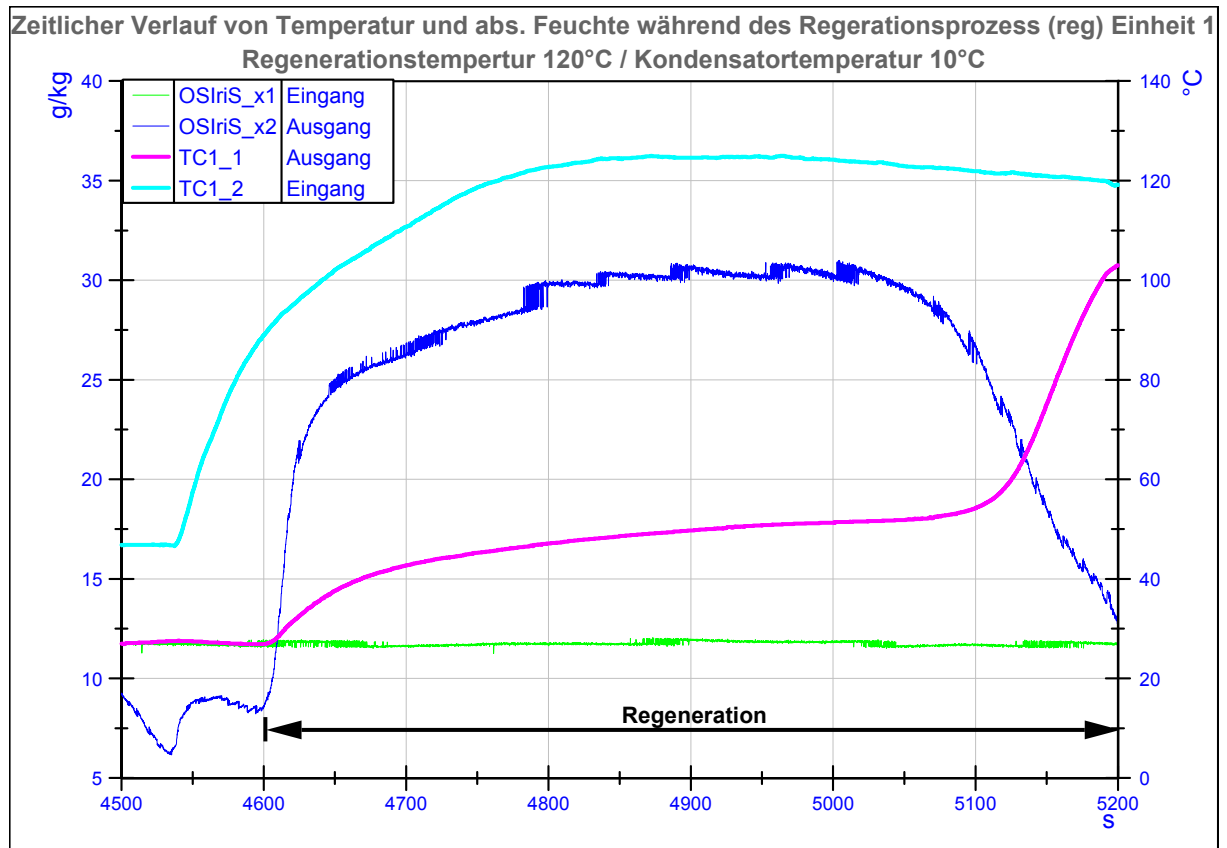


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Regenerationsphase (reg) Einheit 1

6.7.3 RUHEZUSTAND (REST)

An der Zeitachse in Abbildung 22 ist erkennbar, dass der Ruhezustand unmittelbar dem Regenerationsprozess folgt.

Da die Performance des Materials abhängig ist von der relativen Feuchte der Umgebung, wirkt sich eine niedrigere Temperatur des Materials positiv auf die Trocknungseigenschaften aus. Das heißt, je länger die Ruhephase, umso besser ist das für den folgenden Trocknungsprozess.

Während der Ruhephase sind alle Ventile (in diesem Fall V1, V2, V3, V4) geschlossen, weswegen keine Informationen zu absoluter Feuchte angegeben werden. Die Temperatur innerhalb der Kartusche nimmt kontinuierlich ab.

Um zu verdeutlichen, warum die Temperatur ab 5850s wieder ansteigt, ist der aktuelle Status in der Abbildung angegeben. Zu Anfang der Ruhephase befindet sich das System in Status 11. Das heißt, die Regeneration die in Status 1 stattfindet ist zu diesem Zeitpunkt schon abgeschlossen, während die Trocknung weitergeht. Ist die Trocknung beendet, kommt es bei der Umschaltung von Status 22 zu Status 3 dazu, dass Einheit 1 nochmals mit heißer Luft durchströmt wird.

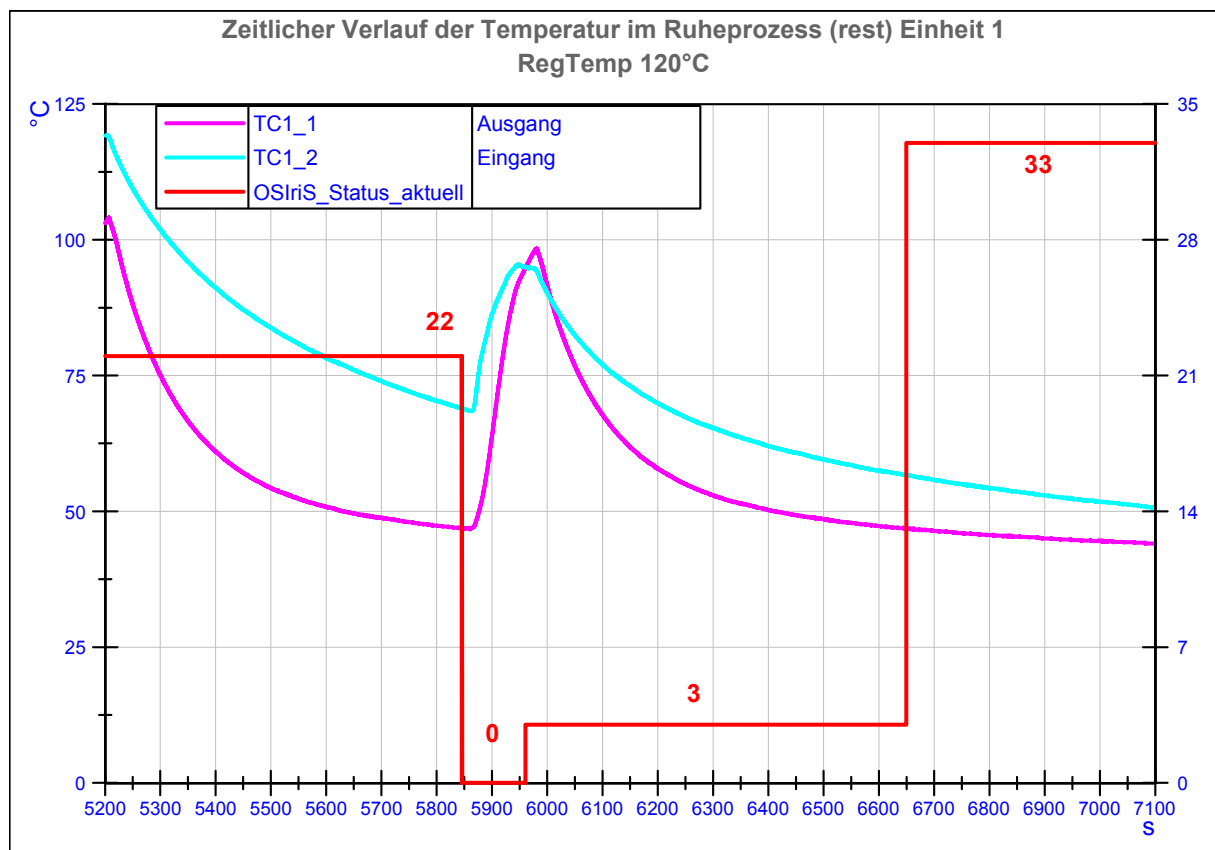


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Ruhephase (rest) Einheit 1

Um das wiederholte Durchströmen der regenerierenden Einheit zu verhindern, muss die Steuerung modifiziert werden. Da in der ursprünglichen Programmierung ein Bypass (gelb in Abbildung 11, Seite 39) nicht eingeplant war und erst nachträglich eingefügt wurde, erfolgt die Umschaltung aus dem Bypass in 4 Schritten. Die Abfolge der Schritte muss auf 3 reduziert werden. Es ist notwendig während der Umschaltung die BZ über den Bypass mit Luft zu versorgen. Erfolgt die Umschaltung wie in Tabelle 14 dargestellt, wird das wiederholte Durchströmen verhindert. Tabelle 15 zeigt die dadurch veränderte Abfolge der Phasen.

Tabelle 14: Alternative Schaltfolge (1 = offen; 0 = geschlossen)

Schritt	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	VK1	VK2	VK3	VBP
Ausgangsposition	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Tabelle 15: Alternativer Phasenverlauf OSIrS

Schritt	Einheit 1				Einheit 2				Einheit 3			
	dry	reg	rest	purge	dry	reg	rest	purge	dry	reg	rest	purge
Ausgangsposition	X						X				X	
1	X						X		X			
2				X			X		X			
3		X					X		X			

6.7.4 DER UMSCHALTVORGANG

Während des dauerhaften Betriebes gibt es 2 Umschaltungen innerhalb eines Zyklus. Das ist zum einen der Wechsel in einen neuen Status und zum anderen der Wechsel in den Bypass nach Beendigung der Regeneration, was ein Spezialfall des alten Status ist (siehe 6.4.2).

In Abbildung 23 ist der Wechsel von Status 11 nach 2 dargestellt. Das Diagramm zeigt die absoluten Feuchten am BZ-Kathodeneingang (OSIriS_x2), am Eingang des Trockners (OSIriS_x3), am Ausgang des Trockners (OSIriS_x4) sowie die Temperatur am BZ-Kathodeneingang (ACE_1_1_Temp). Um die Umschaltung verfolgen zu können, ist der Parameter OSIriS_Status_aktuell abgebildet, welcher den aktuellen Status des Systems angibt. Während den Umschaltphasen beträgt der Wert 0. Die Umschaltung wird im Zeitintervall 4435s bis 4550s durchgeführt.

Die absolute Feuchte am Eingang des Trockners (OSIriS_x3) ändert sich durch den Umschaltvorgang nicht. Das leichte Schwingen des Wertes wird durch das Schwingungsverhalten der Kondensatorkühlung ausgelöst.

Der Anstieg der absoluten Feuchte auf ca. 5g/kg am Ausgang des Systems (OSIriS_x4) wurde in Kapitel 6.7.1 beschrieben und ist auf das Verhältnis von rel. Feuchte und Adsorptionsvermögen des Trocknungsmaterials zurückzuführen.

Das Abfallen der absoluten Feuchte am Eingang der BZ (OSIriS_x2) zwischen 4500s und 4550s geht zurück auf den Umschaltvorgang vom Bypass (Status 11 bis 4435s) in den nächsten Trocknungs- und Regenerationsbetrieb (Status 2 ab 4450s). Die Umschaltung führt dazu, dass die zuvor regenerierte Einheit ein weiteres Mal durchströmt wird. Da die Einheit zuvor regeneriert wurde, wird die Zuluft getrocknet und fällt auf ca. 7g/kg absolute Feuchte. Der gleichzeitige Temperaturanstieg am Eingang der Brennstoffzelle ist auf die von der Regeneration noch heiße Einheit zurückzuführen, aus der Wärme ausgetragen wird (siehe Abbildung 22).

Dieses Verhalten lässt sich analog zu dem Vorschlag im vorherigen Kapitel, die Umschaltung aus dem Bypass in den nächsten Status in drei Schritten vorzunehmen, ändern.

50s nach Beendigung der Umschaltung (4450s) beginnt die Regeneration, wodurch die absolute Feuchte am Eingang der BZ wieder ansteigt (4600s)

In Abbildung 24 ist der Umschaltvorgang in den Bypass (Status 2 nach 22) dargestellt. Ist eine Temperatur von $> 100^{\circ}\text{C}$ am Ausgang der Einheit (TC1_1) erreicht, wird die Umschaltung in den Bypass automatisch durchgeführt (vgl. Definition Ende der Regeneration in 6.4.2 Seite 49 ff). Die Temperatur am Eingang der BZ (ACE_1_1_Temp) steigt parallel mit der Ausgangstemperatur der Einheit (TC1_1).

Die Auswirkung dieser Vorgänge auf die Performance der BZ ist Gegenstand des nächsten Kapitels.

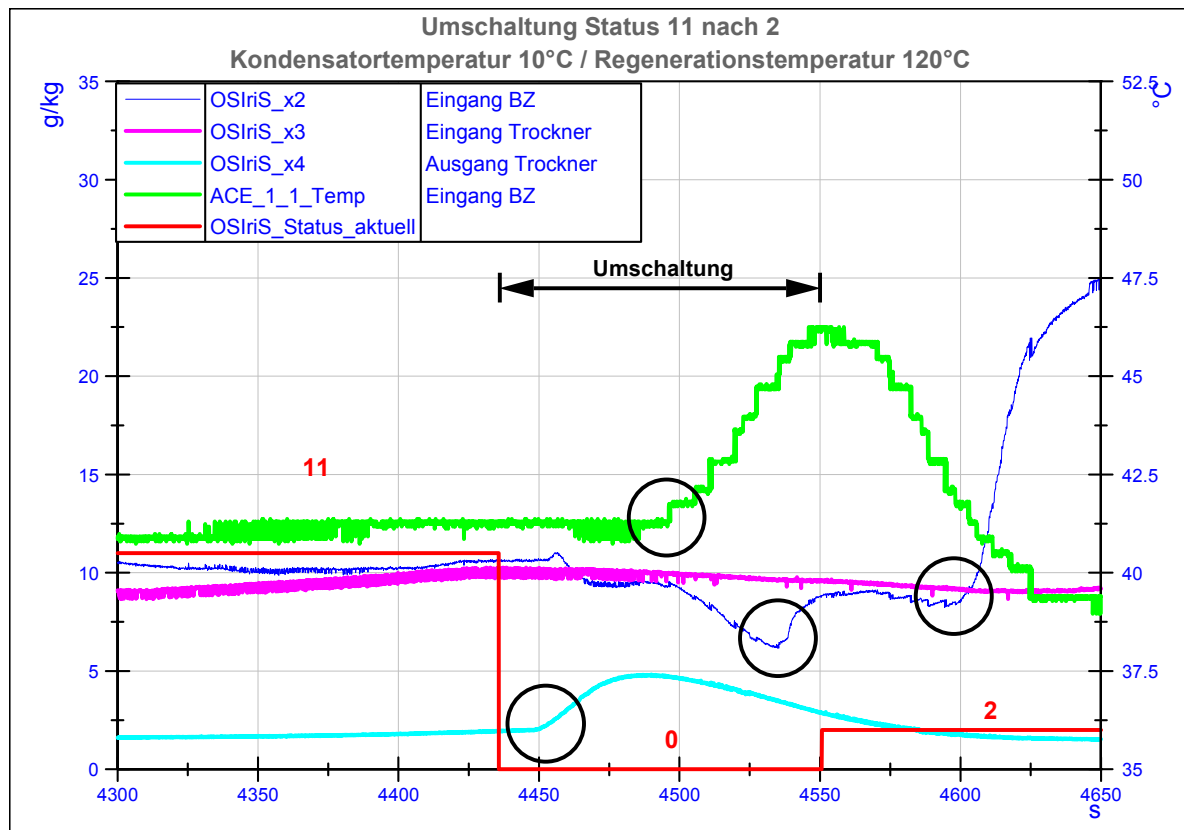


Abbildung 23: Umschaltung Status 11 nach 2

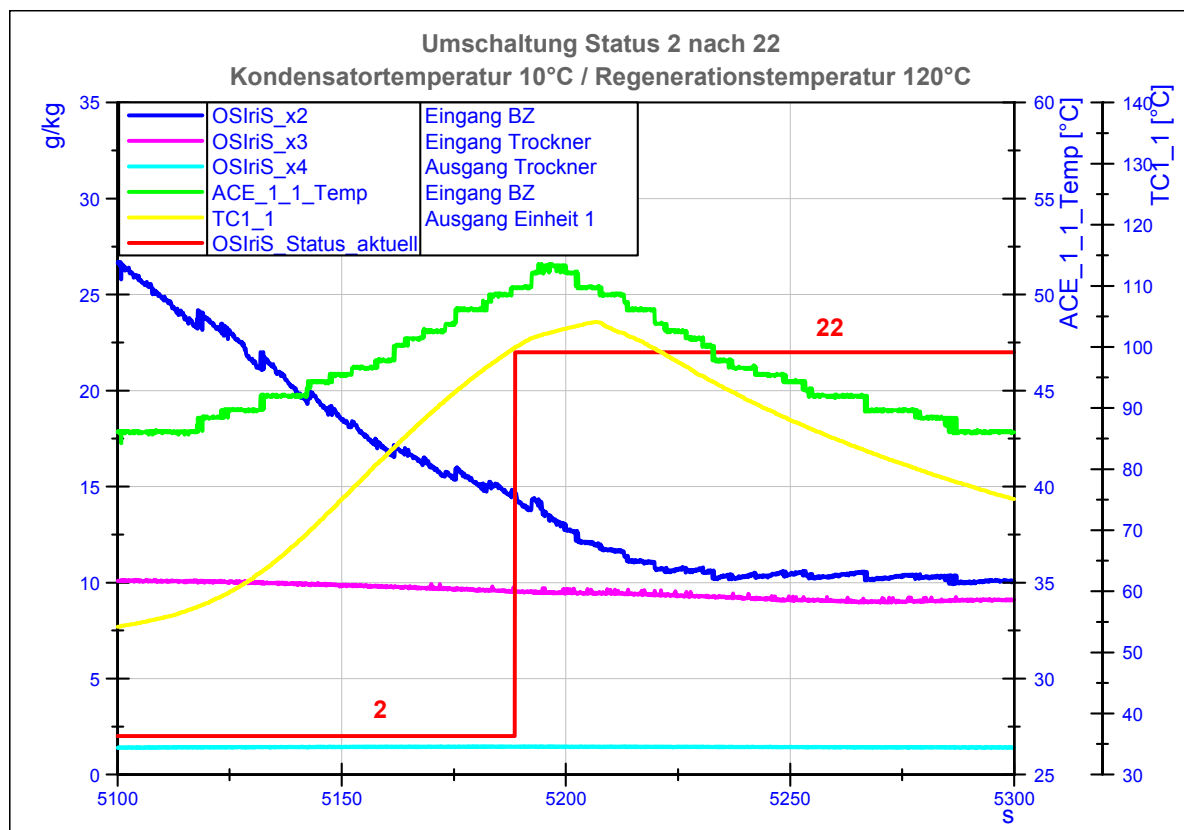


Abbildung 24: Umschaltung Status 2 nach 22

6.7.5 BELASTUNG DER BRENNSTOFFZELLE

Da die Brennstoffzelle direkt mit der vorher zur Regeneration benutzen Luft versorgt wird, variieren die klimatischen Bedingungen am Kathodeneingang der BZ. Durch die zyklische Betriebsweise des Trockners schwankt die absolute Feuchte am Kathodeneingang zwischen 3 bis 30g/kg. Die Temperatur am Eingang bewegt sich zwischen 30 und 55°C.

Ein Maß für die Stabilität der BZ ist der Statuswert (FCS_ECUSatus), den die Steuerung der BZ ausgibt. Ist die Zelle im normalen Betriebszustand, beträgt dieser Wert 5. Im Falle, dass die Spannung der Zelle unzulässig fällt, wird der Status 12 ausgegeben und die BZ-Steuerung erhöht für kurze Zeit den Luftvolumenstrom, welcher durch die Zelle geführt wird. Dies gefährdet das Ziel, ein inertes Gas zu erzeugen, weil mit einem höheren Sauerstoffanteil am Kathodeneingang der Sauerstoffanteil am Kathodenausgang ebenfalls erhöht wird. Der Statuswert der BZ hat keinen direkten Bezug zum Statuswert des Trockners sondern bezieht sich nur auf den Zustand der BZ.

Abbildung 25 zeigt den Verlauf von Zellspannung, Temperatur und absoluter Feuchte Kathodeneingang sowie den Status der Zelle. Die durch die Statusveränderung (FCS_ECUSatus) angezeigten Stabilitätsprobleme der BZ (1900s, 3500s, 5100s, 6700s) treten zu Zeitpunkten auf, in denen die Belastung des Kathodeneingang durch Wasser (~ 10g/kg) und Temperatur (~ 36°C) nicht erhöht ist. Eine Destabilisierung der BZ durch erhöhte absolute Feuchten oder schwankende Temperaturen ist also nicht zu beobachten. Die Störungen treten während der Umschaltvorgänge auf, wie weitergehend auf Abbildung 26 gezeigt wird.

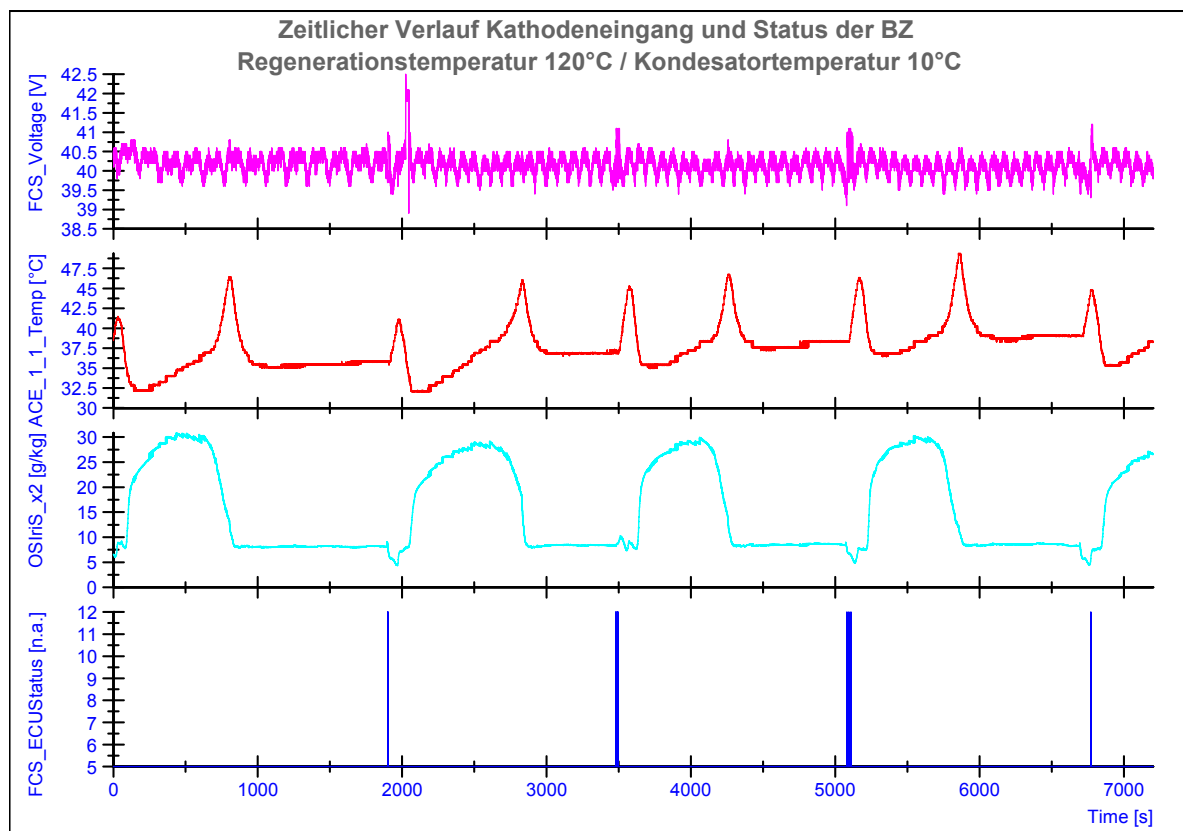


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Stabilität der BZ

Abbildung 26 zeigt die Umschaltung von Status 22 zu 3. Aufgeführt sind Stackspannung (FCS_Voltage), Status der BZ (FCS_ECUStatus) und die aktuelle Position der Ventile (OSIriS_position_aktuell).

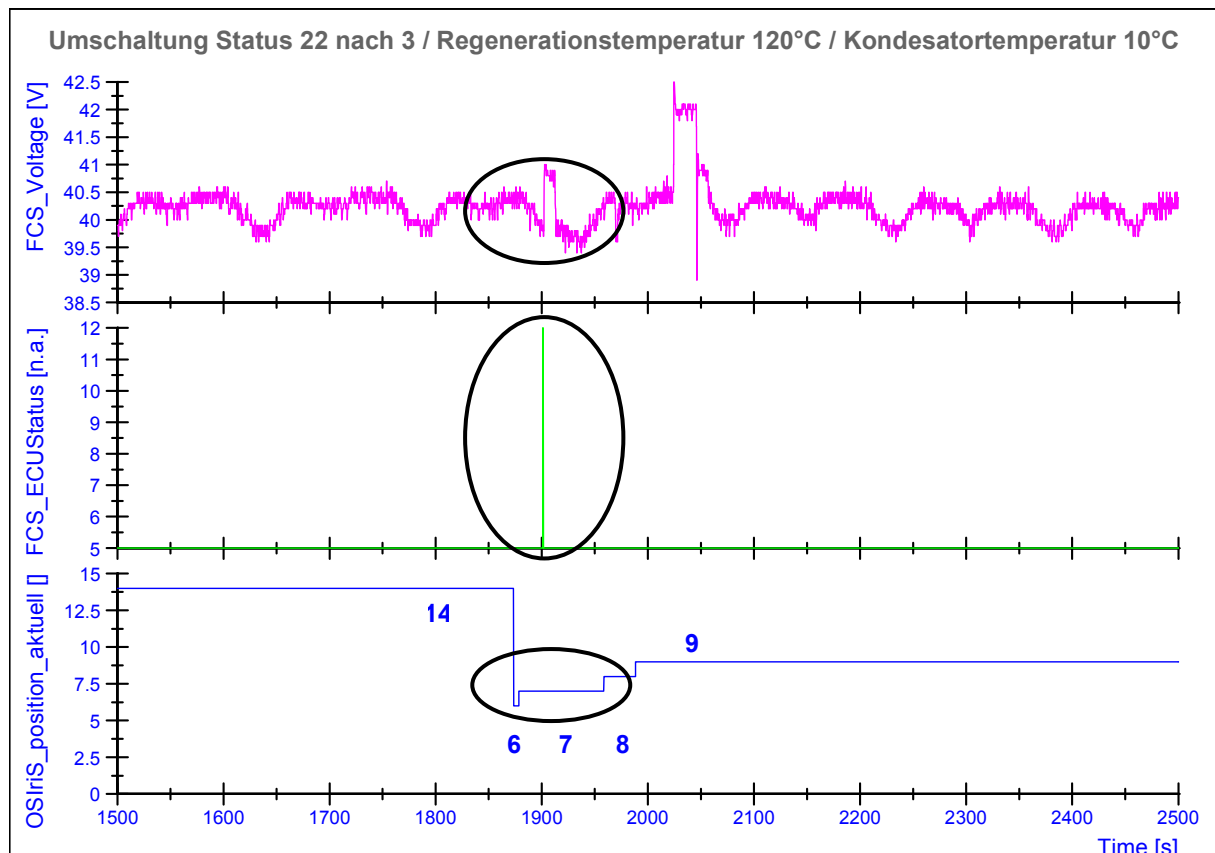


Abbildung 26: Stabilität der BZ bei einer Umschaltung

Die Fehlermeldung wird ca. 15s nach der Umschaltung von Position 6 nach Position 7 ausgegeben. In Position 7 wird die Belüftung von Einheit 2 durchgeführt (vgl. 6.4.2). Die Störung wird durch die falsche Positionierung der Sensorik ausgelöst. Abbildung 17 auf Seite 46 zeigt die Positionen der Sensoren innerhalb des Systems. Durch die Belüftung der Trocknungseinheit geht ein Teil der Prozessluft für die BZ verloren. Da der Verlust an Prozessluft genau zwischen der Position der Messung (ECU_Airflow) und der Brennstoffzelle stattfindet, wird dieser Verlust nicht detektiert und deswegen nicht ausgeglichen.

Die BZ wird undetektiert mit weniger Luft versorgt, was den Fehlerfall hervorruft. Dieser Effekt ist in allen Messreihen zu beobachten, unabhängig davon, welche Umschaltung vorgenommen wird. Es kommt nicht in jedem Fall einer Umschaltung zu einer Störung und die Anzahl an Störungsmeldungen variieren. Der Grund für dieses Verhalten ist aus den vorliegenden Daten nicht ersichtlich.

Es nicht möglich eine Aussage darüber zu treffen ob die Performance der BZ durch die veränderten Bedingungen insgesamt besser oder schlechter ist. Die Stackspannung (FCS_Voltage) veränderte sich im Laufe der Versuchsreihen immer wieder. Bei gleichen Betriebsbedingungen veränderte sich die Stackspannung um bis zu 4%. Das unstetige Verhalten überlagerte eventuelle Veränderungen der BZ-Performance.

6.7.6 VARY CONDENSATION TEMPERATURE (VCT)

In dieser Testreihe wird der Einfluss der Temperatur am Kondensator auf die Trocknungsleistung untersucht. Die angegebene Temperatur ist das arithmetische Mittel (Δt = Versuchszeit) der Temperatur am Kühlwassereingang des Kondensator (ACE_K5_8_1_Cd_CWin, siehe Abbildung 17 / Seite 46).

Mit steigender Temperatur am Kondensator steigt die absolute Feuchte am Eingang der Trocknung (OSIriS_x3). Die Menge an Wasser, die pro kg Luft entfernt werden muss, nimmt mit steigender Temperatur zu. Müssen bei einer Kondensatortemperatur von 6,5°C nur ca. 6g/kg entfernt werden, liegt der Wert bei einer Temperatur von 20°C schon bei über 15g/kg (siehe Abbildung 27).

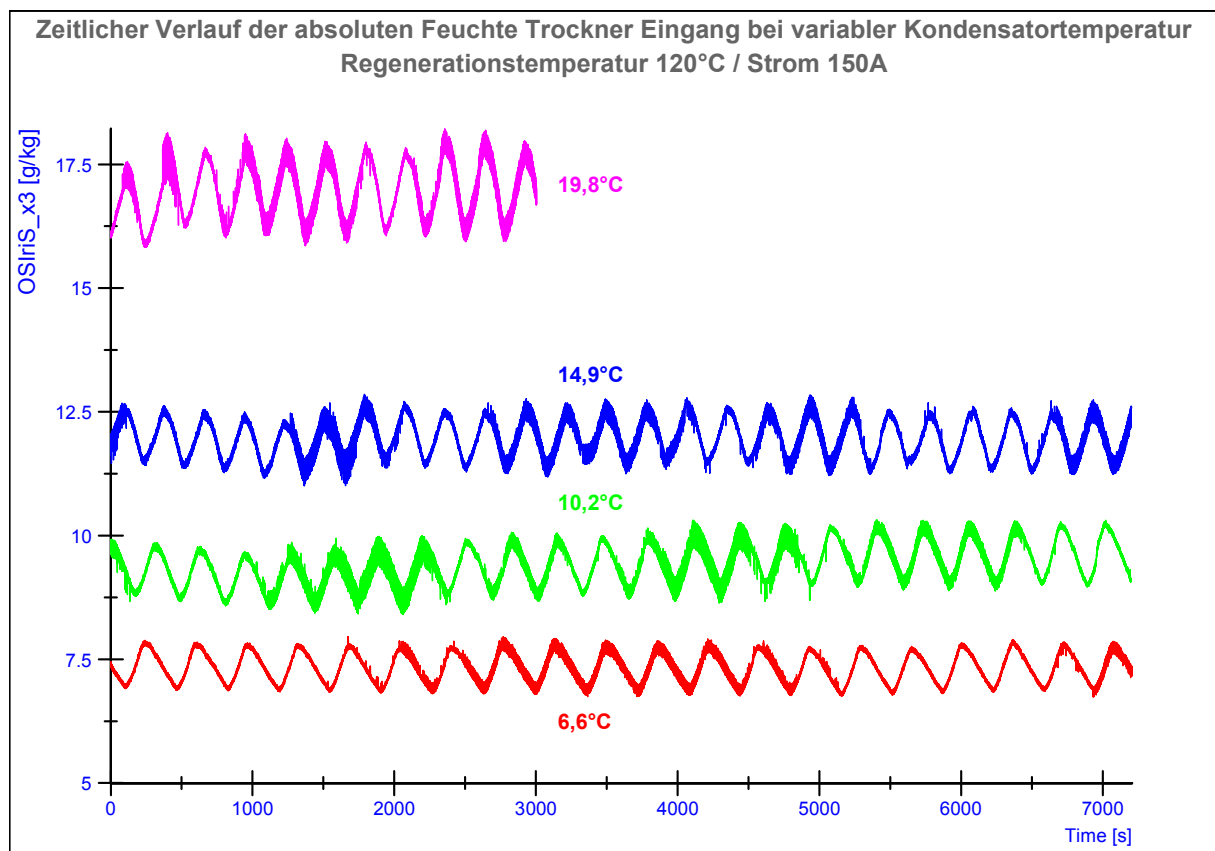


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Eingang (VCT)

Die steigende Wasserlast wirkt sich auf den Ausgang des Trockner aus (siehe Abbildung 28 und Tabelle 16). Bei 6,6°C erreicht die Trocknung 1,3g/kg im Mittel, bei 10,2°C 1,6g/kg und bei 14,9°C einen Wert von 1,8g/kg. Bei 14,9°C wird der geforderte Grenzwert (< 2g/kg) nur knapp erreicht. Bei einer Temperatur von 19,8°C ist der Grenzwert nicht mehr einzuhalten. Der Wert (OSIriS_x4) sinkt zu keiner Zeit unter den Grenzwert (siehe Abbildung 28) und erreicht im arithmetischen Mittel 3g/kg (siehe Tabelle 16).

Mit veränderter Kondensatortemperatur, ändert sich die Zykluszeit. Durch den erhöhten Wassereintrag bei steigender Temperatur verkürzt sich die Zeit, in der die Einheit in der Lage ist, den geforderten Wert von < 2g/kg zu erreichen.

Bei 6,6°C Kondensatortemperatur ergibt sich eine Trocknungszeit von ~ 1700s. Bei 14,9°C verkürzt sich die Zeit auf 1000s. Wird die Kondensatortemperatur 19,8°C eingestellt, sinkt die Zykluszeit auf 0s, da der Grenzwert dauerhaft überschritten wird, und damit permanent umgeschaltet werden müsste. Wegen der bei dieser Einstellung dauerhaft laufenden Regeneration heizen sich die Rohre am Eingang der BZ auf. Aus diesem Grund, und wegen der dauerhaften Überschreitung des Grenzwertes, wurde der Versuch nach 3000s abgebrochen. Abbildung 28 zeigt die veränderten Trocknungszeiten.

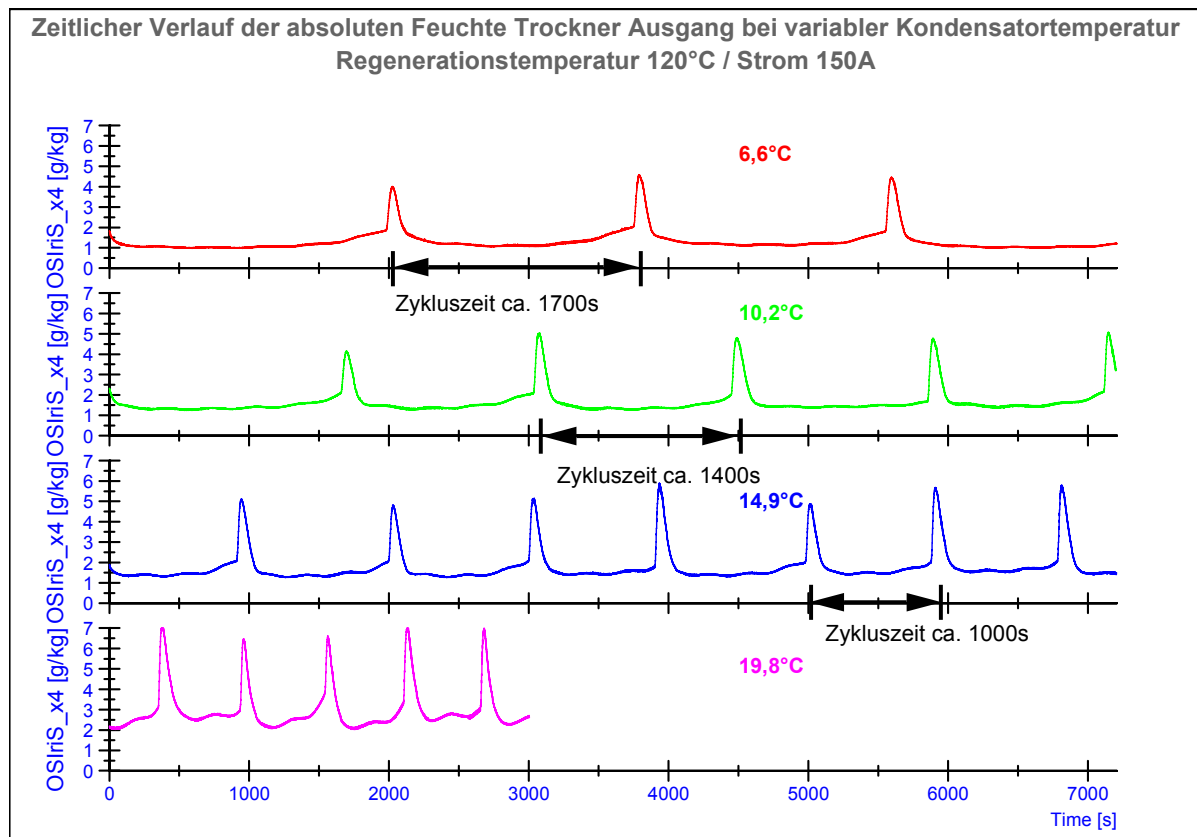


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VCT)

Tabelle 16: Trocknerleistung bei variabler Kondensatortemperatur (VCT)

arithmetisches Mittel ACE_K5_8_1_Cd_CWin Δt = Versuchszeit	arithmetisches Mittel OSIrS_x4 Δt = Versuchszeit
6,6°C	1,3g/kg
10,2°C	1,6g/kg
14,9°C	1,8g/kg
19,8°C	3,0g/kg

Abbildung 29 zeigt den zeitlichen Verlauf der Statusmeldungen bei veränderlichen Kondensatortemperaturen. Befindet sich die BZ im Normalbetrieb, wird der Statuswert (FCS_ECUSatus) 5 ausgegeben. Liegt eine Störung der Zellspannung vor, wird der Wert auf 12 erhöht.

Bei einer Temperatur von 6,6°C ist keine Störung zu sehen, während bei höheren Temperaturen (10,2°C, 14,9°C, 19,8°C) Störfälle auftreten. Ein Zusammenhang zwischen diesem Verhalten und der Kondensatortemperatur konnte nicht festgestellt werden. Die gezeigten Störungen werden durch die Belüftung der Einheiten (Erklärung siehe 6.7.4) ausgelöst.

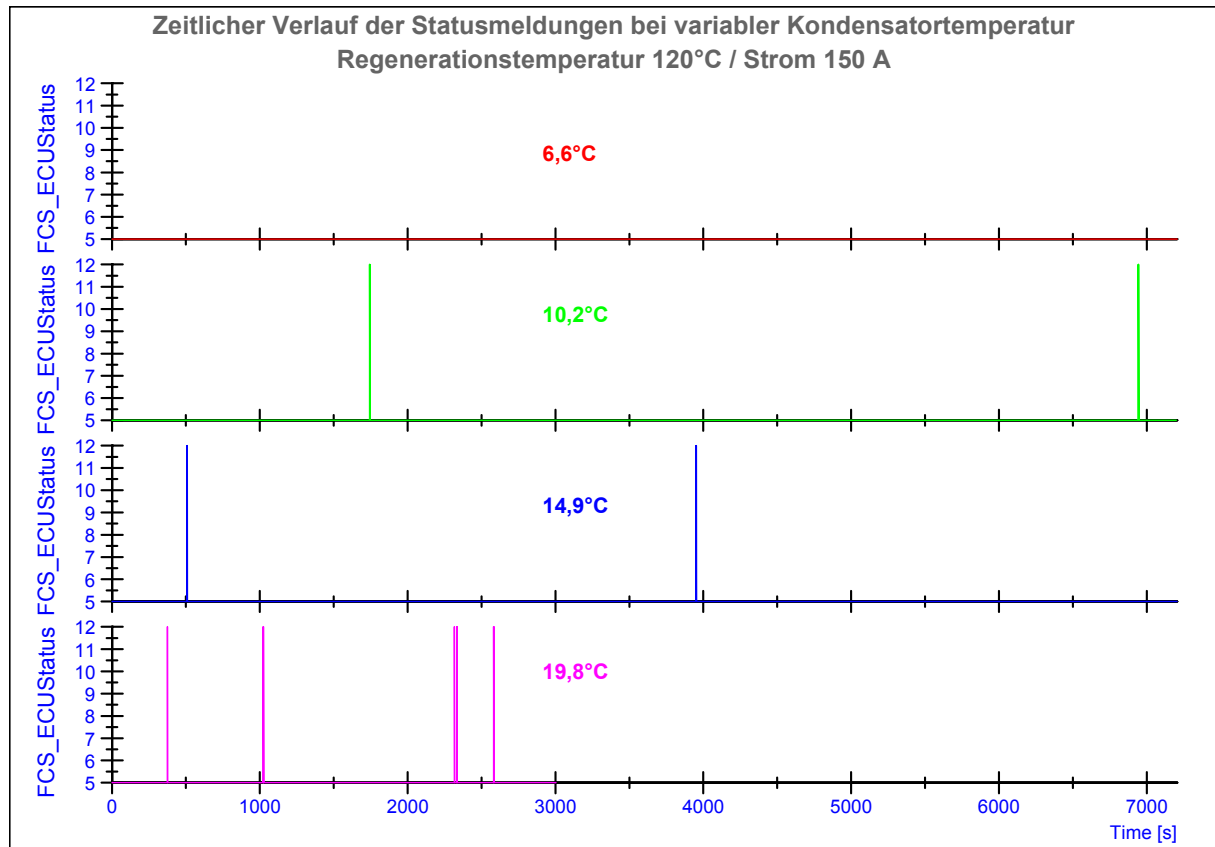


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VCT)

6.7.7 VARY REGENERATION TEMPERATURE (VRT)

In der Versuchsreihe VRT wird die Temperatur am Eingang der Regeneration mit der Zeit verändert. Bedingt durch die Regelung des Heizers wird der Sollwert (Setpoint) des Heizers 3K höher als die geforderte Temperatur am Eingang der Regeneration eingestellt. Wäre der Sollwert des Heizers exakt auf die geforderte Temperatur eingestellt worden, hätte die Regelung des Heizers die Temperatur zu früh herunter geregelt. Der Mittelwert (mean) der Temperatur weicht mit zunehmender Setpointtemperatur stärker von der angestrebten Temperatur ab (delta T in Abbildung 30). Der Unterschied zwischen kleinstem und größtem Regelwert beträgt 30K. Die arithmetischen Mittelwerte (Δt = Versuchszeit) von höchstem und niedrigstem Setpoint unterscheiden sich nur um 19K.

Bei der Einstellung 103°C ist das Umschaltkriterium für die Umschaltung in den Bypass auf 90°C abgesenkt, da 100°C am Ausgang der Einheit nie erreicht werden.

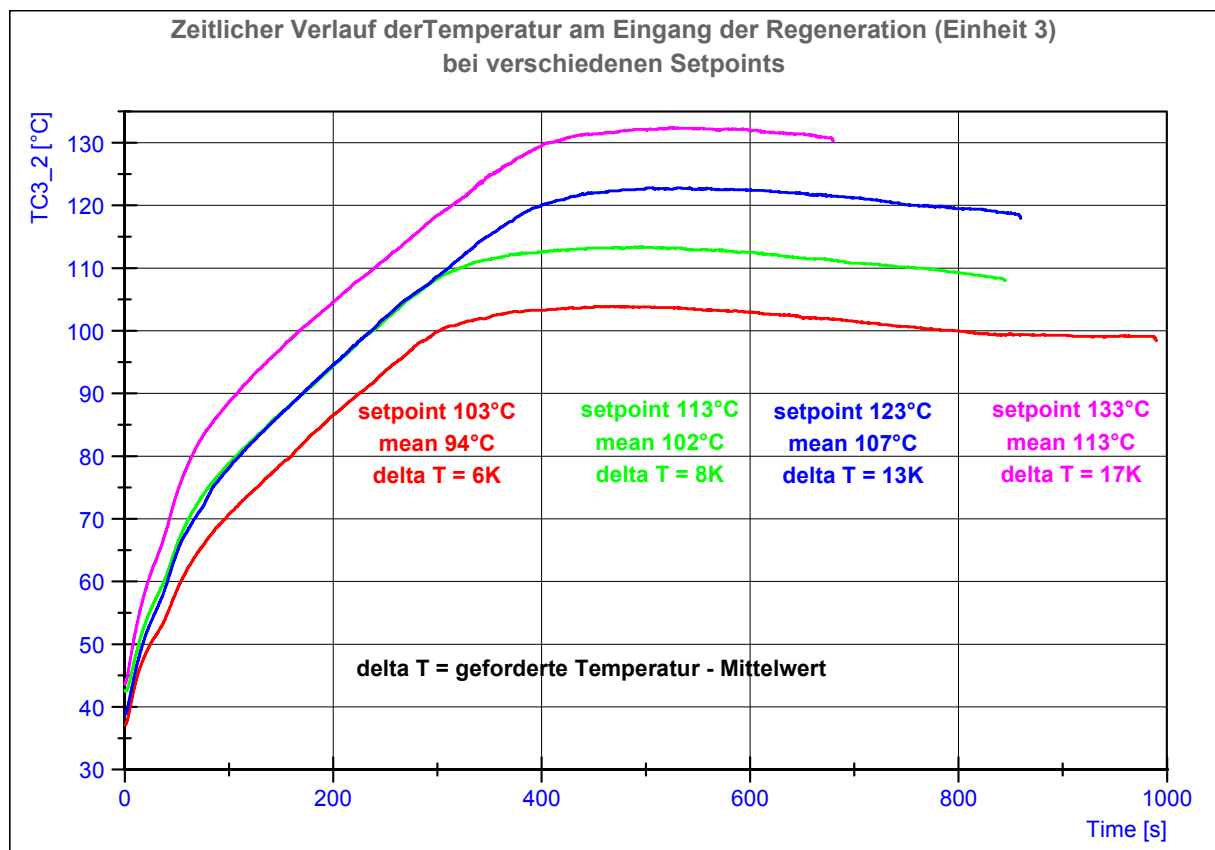


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Temperatur am Eingang der Regeneration (VRT)

Abbildung 31 zeigt, dass die geänderte Regenerationstemperatur keine signifikante Veränderung der Zykluszeit in der Trocknungsphase zur Folge hat. Bei den arithmetischen Mittelwerten (Δt = Versuchszeit) ist eine Veränderung zu erkennen. Zwar wird mit einer Regenerationstemperatur von 130°C ein besseres Trocknungsergebnis erzielt, aber eine höhere Regenerationstemperatur bedeutet auch einen höheren Energieverbrauch (Tabelle 17).

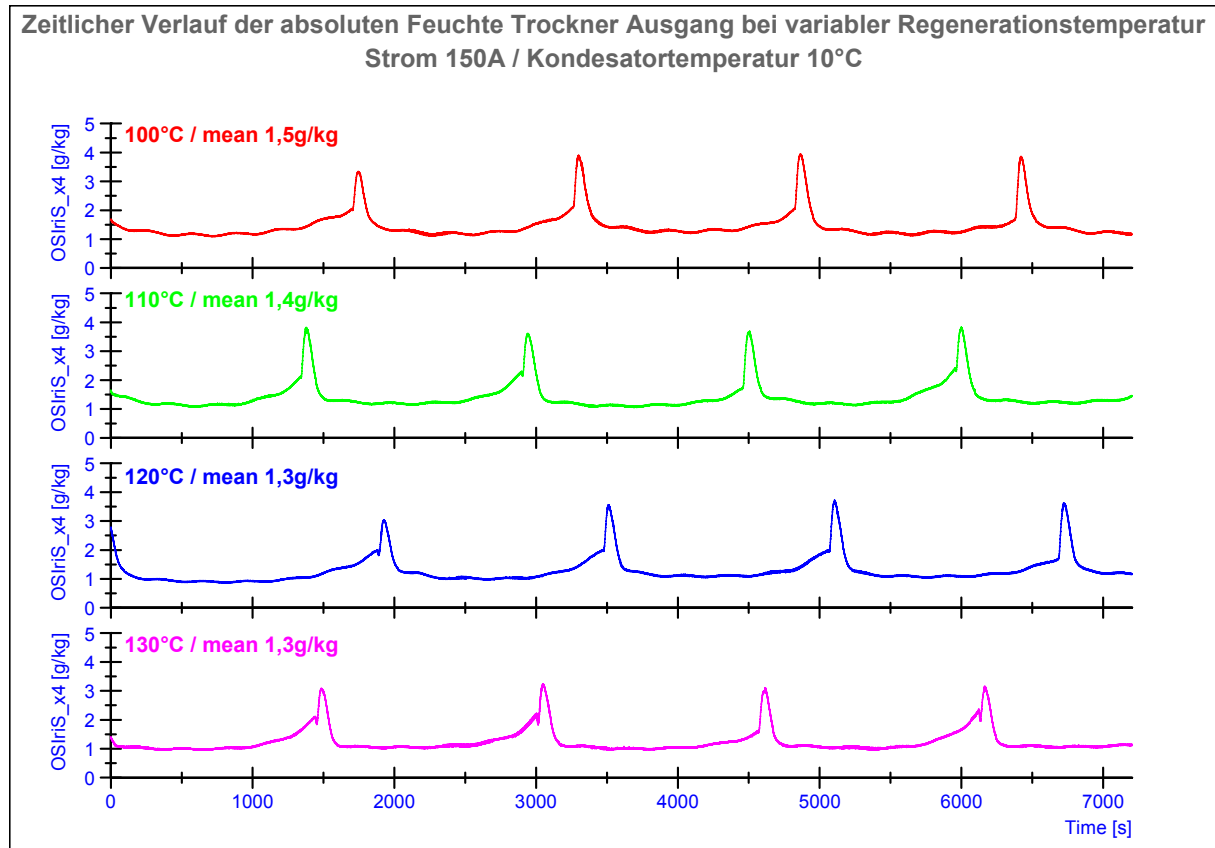


Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VRT)

Bedingt durch die erhöhten Temperaturen der Regeneration ergeben sich höhere Spitzenwerte in der absoluten Feuchte am Kathodeneingang der BZ, da das in Silicagel adsorbierte Wasser durch die höheren Temperaturen schneller desorbiert wird (Tabelle 17)

Tabelle 17: Übersicht vary regeneration temperature (VRT)

Setpoint Heizer	Arithmetisches Mittel TC3_2 Eingang Rege- neration	Arithmetisches Mittel OSIrIS_x4 Ausgang Trockner	Spitzenwert OSIrIS_x3 Eingang BZ
103°C	94°C	1,5g/kg	25,5g/kg
113°C	102°C	1,4g/kg	27,0g/kg
123°C	107°C	1,3g/kg	30,8g/kg
133°C	113°C	1,3g/kg	30,5g/kg

Die veränderlichen Spitzenwerte der absoluten Feuchte zeigen keinen Effekt auf die BZ (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33). Die in Abbildung 33 auftretenden Störungen sind auf den während der Umschaltung durchgeführten Belüftungsschritt zurückzuführen. Dieser Effekt ist auf den Luftverlust bei der Belüftung der Einheiten zurückzuführen. Er wurde in Kapitel 6.7.5 behandelt.

Die mit einem Pfeil in Abbildung 33 gekennzeichnete Statusveränderung fällt nicht mit einer Umschaltung zusammen. Die durch die Brennstoffzelle erzeugte elektrische Energie wird mit Wechselrichtern in das öffentliche Netz eingespeist. In seltenen Fällen kommt es durch Schwankungen im Netz zu einem Ausfall einer oder mehrerer dieser elektrischen Lasten. Schaltet sich die Last kurze Zeit später wieder zu, kommt es zu einem kurzen Spannungsabfall des Stacks, der in manchen Fällen zu einer Störung führt. In diesem Fall ist genau dies geschehen.

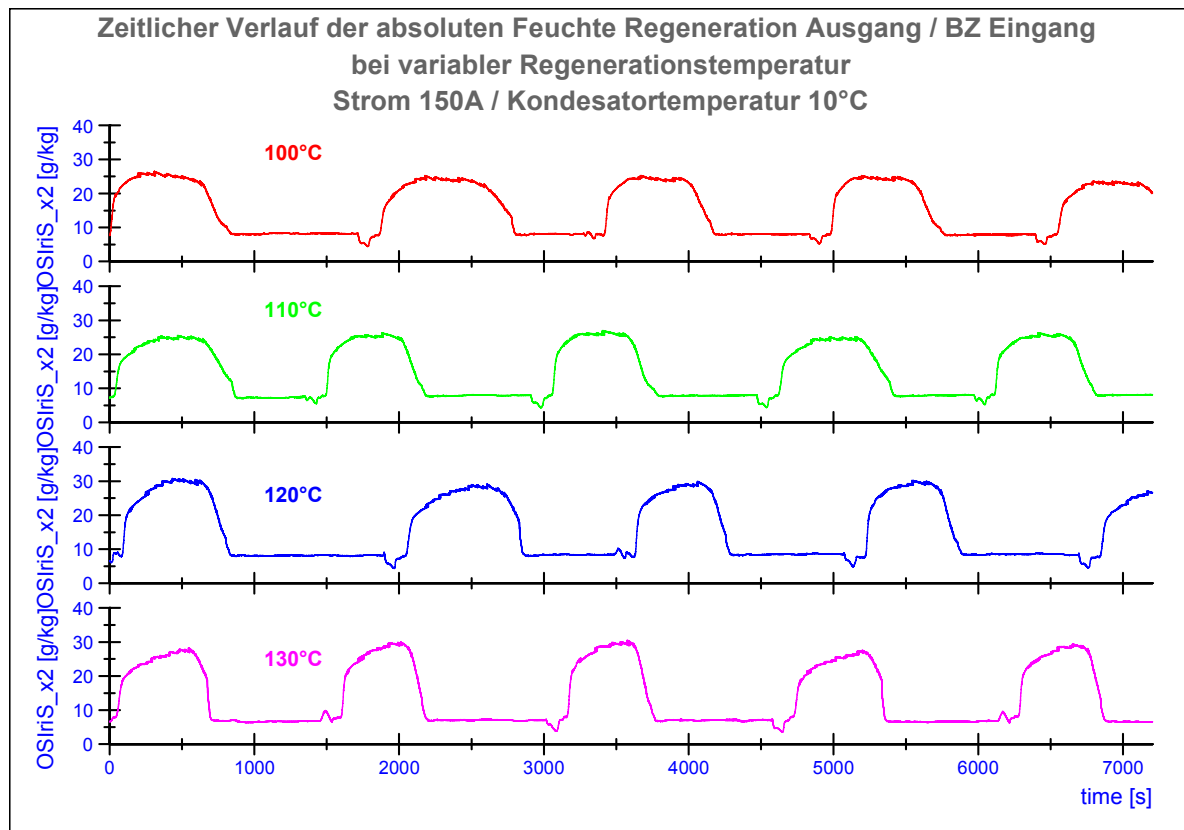


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte BZ in (VRT)

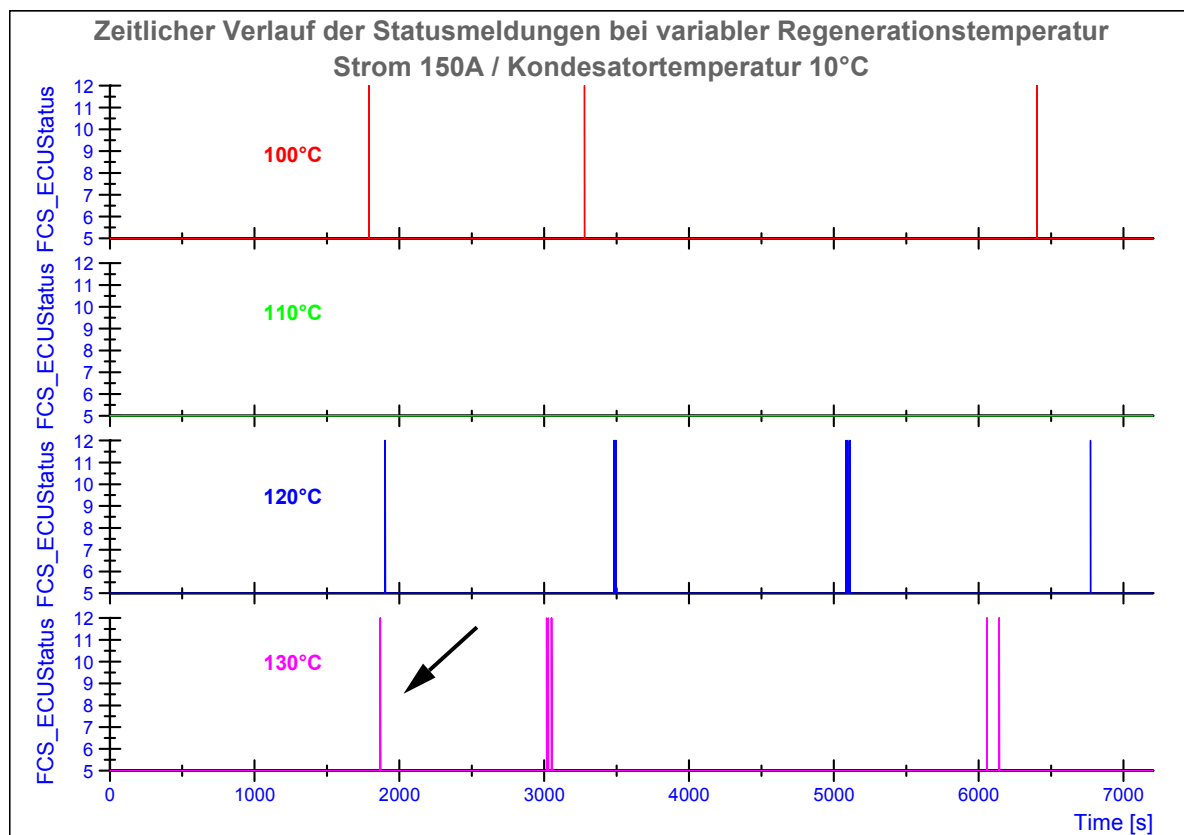


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VRT)

6.7.8 VARY MOISTURE LOADING (VML)

Durch die unterschiedlichen Leistungsbereiche, in denen die BZ in dieser Testreihe gefahren wird, verändert sich die Menge an eingetragenen Wasser. Anders als bei den Versuchen in Kapitel 6.7.6, in denen mit der Veränderung der Kondensatortemperatur die Belastung durch die absolute Feuchte erhöht wird, wird sie hier durch einen größeren ODA-Massenstrom verändert. Die Kondensatortemperatur bleibt bei 10°C. Die absolute Feuchte am Eingang des Trockners liegt bei allen Versuchen dieser Messreihe, analog zu Abbildung 27 Seite 73 bei einer Kondensatortemperatur von 10°C, bei ca. 9g/kg.

An den zeitlichen Verläufen der absoluten Feuchte am Ausgang der Trocknung (Abbildung 34) ist zu sehen, dass sich mit erhöhter Leistung der BZ die Zykluszeiten der Trocknung verkürzen. Ein Effekt auf die Trocknungsleistung ist nicht zu erkennen. Bei 100A liegt das arithmetische Mittel der absoluten Feuchte bei 1,0g/kg und weicht bei 150 bzw. 200A nur um 0,1g/kg ab und beträgt 1,1g/kg. Das heißt, dass bei erhöhten ODA-Massenströmen die Trocknung auf gleichem Niveau arbeitet.

In Tabelle 18 ist ein Überblick über die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht vary moisture loading (VML)

Strom BZ	Leistung der BZ	Massenstrom ODA _{dry} nach Formel 6	Arith. Mittel OSiriS_x4 Δt = Versuchszeit
100A	4,3kW	3,3g/s	1,0g/kg
150A	6,0kW	5,0g/s	1,1g/kg
200A	7,6kW	6,7g/s	1,1g/kg

In Kapitel 6.7.5 wird die veränderliche Stackspannung bei gleichen Betriebsbedingungen im Verlauf der Testreihen beschrieben. Ein Grund für das gehäufte Auftreten von Störfällen, wie bei der Messung mit 150A (Abbildung 35), konnte nicht festgestellt werden.

In Abbildung 29 auf Seite 74 ist der zeitlicher Verlauf der BZ-Statusmeldungen bei exakt denselben Betriebsbedingungen dargestellt (Kurve 10°C). Im Gegensatz zur Messung in Abbildung 35 treten im Verlauf der Messung, außer während der Umschaltungen, keine Störungen auf. Der Vergleich zeigt, dass die Betriebseinstellungen der Peripheriegeräte (Heizer / Kondensator) nicht ausschlaggebend sind für die Stabilität der BZ.

Auf eine Betrachtung der Bedingungen am Eingang der BZ wird an dieser Stelle verzichtet, da dies in vorherigen Kapiteln ausführlich thematisiert wurde, und in dieser Testreihe keine neuen Erkenntnisse erarbeitet werden konnten.

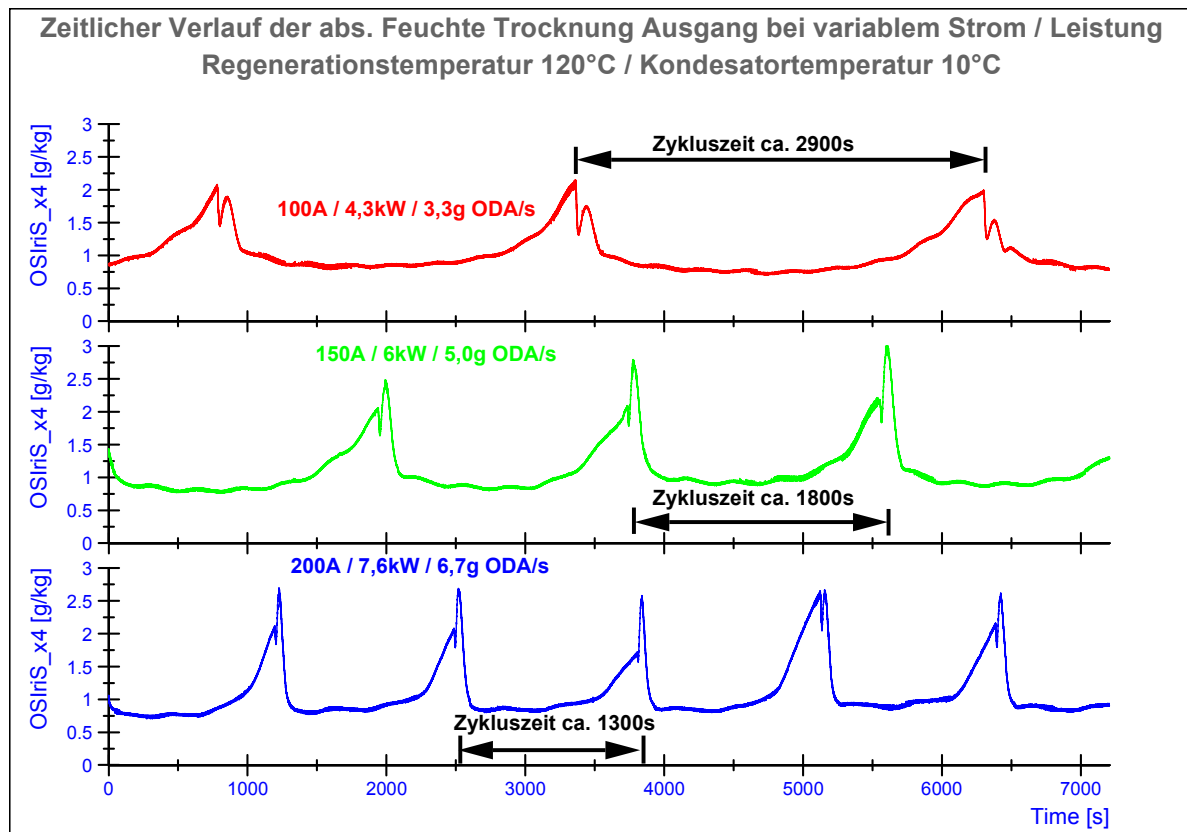


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte Trockner Ausgang (VML)

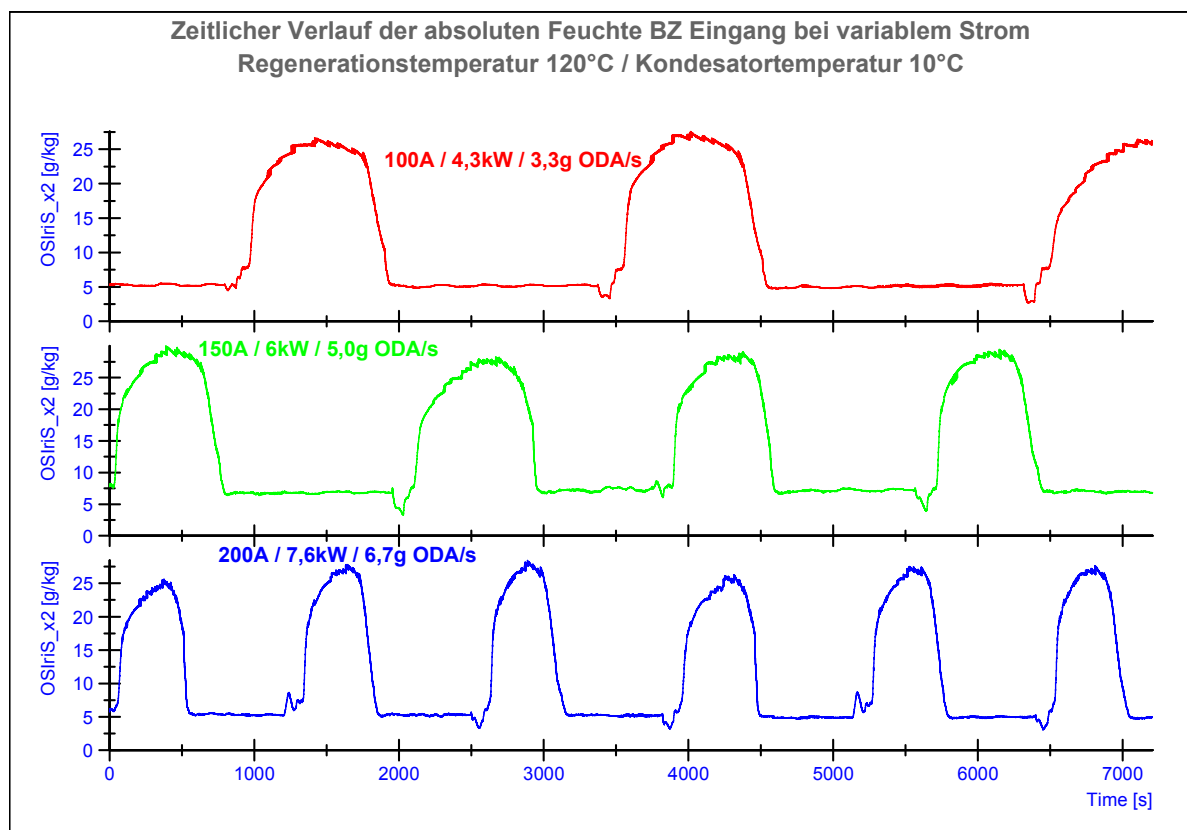


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf Statusmeldungen BZ (VML)

7 FAZIT / EMPFEHLUNGEN

Ziel der Thesis war es zu zeigen, dass es mit geringem Aufwand möglich ist, das vermeintliche „Abfallprodukt“ Kathodenabluft einer Brennstoffzelle so weit aufzubereiten, dass es als Inertgas zur Verwendung in Treibstofftanks von Verkehrsflugzeugen in Frage kommt. Zusätzlich sollte gezeigt werden, dass es möglich ist, die Druckdifferenz zwischen Kabine und Atmosphäre auf Reishöhe eines Passagierflugzeuges auszunutzen, um den benötigten Luftmassenstrom für den Betrieb der Brennstoffzelle und die Trocknung in Bewegung zu setzen ohne die Zuhilfenahme eines Gebläses.

Die Aufbereitung der Kathodenabluft zu einem im Treibstofftank eines Flugzeugs verwendbaren Inertgas war erfolgreich. Die Trocknung der ODA war in allen Betriebsweisen, mit einer Ausnahme, erfolgreich. Lediglich bei zu hohen Temperaturen der Vorkondensierung war die Anlage nicht in der Lage die Grenzwerte einzuhalten ($T > 15^{\circ}\text{C}$).

Durch das erarbeitete verfahrenstechnische Konzept des Systems ist es möglich, die Druckdifferenz zwischen Kabine und Umgebung, auf Reishöhe eines Verkehrsflugzeuges, zu nutzen. Durch die räumliche Trennung von Versorgungsluft und ODA ist eine Verunreinigung der ODA mit Wasser oder O_2 , wie es beim Zonal Dryers aufgrund von Druckunterschieden zwischen den Medienströmen der Fall ist, nicht möglich. Somit spielen die Druckverhältnisse Innerhalb der Anlage für den Betrieb der Trocknung keine Rolle mehr.

Des Weiteren sollten die Vorgaben des PTS (purchaser technical specification) der Airbus Operations GmbH eingehalten werden. Im Folgenden wird aufgeführt, inwiefern die Versuchsergebnisse der geplanten, aufgebauten und getesteten Anlage diese Vorgaben erfüllen.

1. *Das IGCS soll die ODA so konditionieren, dass nicht mehr als 100g Wasser während einer 500NM (nautic miles) design mission in den Tank eingetragen werden. Das entspricht einer absoluten Feuchte von $< 2 \text{ (g H}_2\text{O)}/(\text{kg ODA})$ im Mittel der Zeit.*

Es konnte nachgewiesen werden, dass es mit dem erarbeiteten System möglich ist, den geforderten Grenzwert von $< 2\text{g/kg}$ im Mittel der Zeit einzuhalten.

2. *Das IGCS soll zwei ODA-Massenströme konditionieren können: high flow rate von 25g ODA/s und eine low flow rate von 4g ODA/s.*

Die Auslegung aller Komponenten erfolgte für den Betrieb bei high flow rate. Der praktische Nachweis wurde nur für den Betrieb mit low flow rate erbracht.

3. *DAS IGCS soll ODA mit einer Sauerstoffkonzentration zwischen 10,1Vol.-% und 11,1Vol.-% konditionieren können.*

Wegen Problemen mit der Sauerstoffsensorik und dem Aufbau, konnte der Nachweis für die Grenzwerte des Sauerstoffgehalts nicht erbracht werden. Es ist davon auszugehen, dass, wenn die BZ ein Inertgas liefert, das IGCS das Gas trocknet, ohne die Sauerstoffkonzentration zu ändern, da weder Stickstoff noch Sauerstoff von dem eingesetzten Trocknungsmaterial adsorbiert werden.

4. *Die Temperatur der ODA soll am Ausgang des IGCS maximal 80°C erreichen.*

Die Forderung nach einer maximalen Temperatur von 80°C am Ausgang des IGCS wurde in allen Testreihen eingehalten.

5. *Das IGCS soll mit Versorgungsdrücken im Bereich von 0,7 bis 1,1bar(a) funktionieren.*

Durch die physikalische Trennung der Regenerationsseite von der ODA-Seite funktioniert das System in dem geforderten Betriebsbereich.

6. *Das IGCS soll normal funktionieren bei ODA Versorgungstemperaturen zwischen 0,7°C und 70°C.*

Wegen der Notwendigkeit einer Vorkondensierung kann dieser Punkt nicht erfüllt werden. Bei Temperaturen von 70°C kommt die Trocknung zum Erliegen.

7. *Die Leistungsaufnahme des IGCS soll nicht über 500W liegen.*

Mit einer Leistungsaufnahme von > 5100W ist diese Forderung nicht eingehalten worden.

8. *Mögliche Beiprodukte der Trocknung (Wasser, Wasserdampf, ODA, Luft) sollen bei Temperaturen von maximal 80°C ausgeleitet werden.*

Durch Verwendung der Regenerationsluft zur Versorgung der BZ fallen keine Beiprodukte an.

Der praktische Nachweis für high flow muss noch erbracht werden.

Für die Stabilität der BZ sind die Umschaltvorgänge problematisch. Die ausgelösten Störungen der BZ ergeben sich durch den Luftverlust, welcher durch die falsche Positionierung der Sensorik nicht detektiert wird. Dieses Problem lässt sich mit einer anderen Positionierung der Volumenstrommessung (ECU_airflow) am Eingang der BZ beheben. Im hier beschriebenen Aufbau ist sie am Eingang des Gesamtsystems (siehe Abbildung 17, Seite 46).

Die Messungen zur Unterdruckfähigkeit des Systems konnten aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden. Bei Vorversuchen fiel auf, dass das System im jetzigen Zustand nicht im Unterdruck betrieben werden kann. Der Grund dafür ist die für die Stabilität der BZ notwendige Belüftung der Einheiten (beschrieben in 6.4.2). Diese funktioniert im Falle eines Saugbetriebes nicht. Durch den Unterdruck am Ausgang senkt sich der Druck innerhalb der Einheiten so weit ab, dass er ungefähr bei Umgebungsdruck liegt. Die Öffnung der Belüftungsventile führt nicht zur Belüftung, da die Luft wegen des fehlenden Druckgefälles still steht. Dieser Umstand lässt sich durch eine alternative Programmierung der Ventilsteuerung ändern. Es muss dafür gesorgt werden, dass die ODA nicht aus der Einheit geblasen, sondern von außen Umgebungsluft eingesaugt wird. Für die Umsetzung muss im Falle von Einheit 1 V2 und VK1 nach der Trocknung geöffnet werden (siehe Abbildung 11, Seite 39). Dabei ist darauf zu achten, dass nicht zu viel Umgebungsluft eingesaugt wird, um die ODA nicht zu verunreinigen.

Das Ziel, die Leistungsaufnahmen des IGCS auf 500W zu begrenzen, wurde verfehlt. Der

Verbrauch der Steuerung ist gering ($< 300\text{W}$), doch die Leistungsaufnahme des Heizers von bis zu 5100W übersteigt den geforderten Rahmen um ein Vielfaches. Bei der Weiterentwicklung des Systems muss darauf geachtet werden, die Leistung an dieser Stelle zu drosseln. Die Nutzung der Brennstoffzellenabwärme, für das Vorwärmen der Regenerationsluft, senkt den Energiebedarf des Heizers und sollte bei weiteren Überlegungen mit einbezogen werden.

Die Testreihe zu variablen Regenerationstemperaturen zeigt, dass auch bei niedrigeren Temperaturen bis zu 100°C ein akzeptables Trocknungsergebnis erzielt wird. Im Hinblick auf Energieeinsparung sollten weitere Testreihen bei Regenerationstemperaturen unter 100°C durchgeführt werden, um zu prüfen ob auch bei diesen Temperaturen die Grenzwerte eingehalten werden. Des Weiteren sollte auch geklärt werden, ob bei höheren Regenerationstemperaturen ($> 130^\circ\text{C}$) eine Trocknung deutlich feuchterer ODA (Kondensatortemperatur $\geq 20^\circ\text{C}$) möglich ist.

Da die Trocknung bei $20^\circ\text{C} / 100\%\text{rf}$ (Eingang Trockner) nicht mehr aufrechtzuerhalten war und bei einer Anwendung in einem Verkehrsflugzeug mit Bedingungen von bis zu $30^\circ\text{C} / 100\%\text{rf}$ gerechnet wird, müssen die Auslegungsparameter zukünftiger Versuchsreihen erweitert werden. Der von CTT Systems verwendete Silicagel Rotor im Zonal Dryer hat die gleiche Dimensionierung wie die in dieser Arbeit verwendeten Rotoren. Bei den vergangenen Testreihen mit dem Zonal Dryer konnte, bei einem Anstieg der Kondensationstemperatur, der Grenzwert der absoluten Feuchte ($< 2\text{g/kg}$) nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund muss im Weiteren eine Anpassung von Durchmesser und Länge der Rotoren an die höheren Anforderungen erfolgen.

Das in dieser Arbeit geplante, aufgebaute und getestete Trocknungssystem liefert bei weiterer Optimierung von Steuerung, Sensorik, Heizkonzept und den Auslegungsparametern der Silicagel Rotoren einen vielversprechenden neuen Ansatz zur Inertgaserzeugung an Bord eines Verkehrsflugzeugs.

8 LITERATURVERZEICHNIS

Datenblatt PVDF Jurima GmbH. (kein Datum). *Jurima GmbH Firmenwebsite*. Abgerufen am 12. November 2011 von <http://www.jurima-gmbh.de/downloads/pvdfdatenblatt.pdf>

Airbus Operations GmbH (PTS). (2010). Purchaser Technical Specification for Inert Gas Conditioning System (Drying Unit) for Laboratory Test Purposes. United Kingdom / Germany: Airbus Operations GmbH internes Dokument.

Airbus Operations GmbH (SRD). (2010). FUEL TANK INERTING SYSTEM (Large Scale Multi-Functional Fuel Cell Application) SRD. United Kingdom / Germany: Airbus Operations GmbH internes Dokument.

AlfaLaval. (2006). *AlfaLaval Firmenwebsite*. Abgerufen am 23. Oktober 2011 von http://www.alfalaval.com/solution-finder/products/alfanova/Documents/AlfaNova_27_AlfaNova_HP_27.pdf

autobloggreen. (1. April 2008). *autobloggreen*. Abgerufen am 19. Oktober 2011 von <http://www.blogcdn.com/green.autoblog.com/media/2008/03/figure1-fuelcellconstruction.jpg>

Chang, K.-S., Chen, M.-T., & Chung, T.-W. (Oktober 2005). Effects of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. *Applied Thermal Engineering Volume 25*, S. 2330-2340.

CTT Systems. (kein Datum). *CTT Systems Firmenwebsite*. Abgerufen am 2. November 2011 von http://www.ctt.se/technicaldescriptions___332.aspx

CTT Systems. (2010). *Supplier Equipment Specification*. UK: CTT Sytems.

diebrennstoffzelle.de. (1. Juli 2000). *diebrennstoffzelle.de*. Abgerufen am 29. August 2011 von <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/index.shtml>

Enzinger, M. (26. April 2010). Memorandum: ODA high flow decision. Hamburg, Hamburg, Deutschland: Airbus Operations GmbH internes Dokument.

Forschungszentrum Jülich. (kein Datum). *Energieagentur NRW*. Abgerufen am 29. August 2011 von Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW: <http://www.brennstoffzelle-nrw.de/index.php?id=39>

Gestis Stoffdatenbank. (2011). *Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung*. Abgerufen am 20. Oktober 2011 von [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/s/001290.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/s/001290.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)

Gründel, H. (2003). Ermittlung der Energie- Stoffbilanz eines Wassergenerierungssystems auf Brennstoffzellenbasis bei variierender Last und Methoden zum Ausgleich. *Diplomarbeit Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel*. Hamburg, Hamburg, Deutschland: Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel.

Gülzower Fachgespräche - Band 25 - Wasserstoff aus Biomasse. (2007). 18267 Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Heinzel, A., Mahlendorf, F., & Roes, J. (2006). *Brennstoffzellen Entwicklung, Technologie, Anwendung 3. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage*. Heidelberg: C.F. Müller Verlag.

Hirschl, B., & Hoffmann, E. (2003). *Zukunftstechnologie Brennstoffzelle? Diffusionsbedingungen und sozialökologische Forschungsempfehlungen unter besonderer Berücksichtigung dezentraler Energieversorgung*, Schriftreihe des IÖW 165/03. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH.

Hydrogenics. (2010). *Hydrogenics- Advanced Power Systems*. Abgerufen am 23. Oktober 2011 von Hydrogenics Fuel Cell Power Systems:
<http://www.hydrogenics.com/assets/pdfs/HyPM-%20Fuel%20Cell%20Power%20Module%20Brochure%202010.pdf>

Iler, R. K. (1955). *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Ithaca, New York: Cornell University Press.

Kordes, K., & Simader, G. (1996). *Fuel Cells and Their Applications*. Weinheim, Federal Republic of Germany: VCH Verlagsgesellschaft mbH.

Kuchling, H. (2001). *Taschenbuch der Physik 17. Auflage*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.

Kurzweil, P. (2003). *Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH.

Larminie, J., & Dicks, A. (2000). *Fuel Cell Systems Explained*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd.

Li, X., Li, Z., Xia, Q., & Xi, H. (April 2007). Effects of pore sizes of porous silica gels on desorption activation energy of water vapour. *Applied Thermal Engineering, Volume 27*, S. 869-876.

Mankenberg. (kein Datum). Produktkatalog. *Produktkatalog Mankenberg*. Lübeck, Schleswig-Holstein.

Nees, K. (5. Februar 2005). Wasserstoff durch Mikroalgen. *Unizeit CAU Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*, S. 8.

Niu, J. L., & Zhang, I. Z. (2002). Effects of wall thickness on the heat and moisture transfers in desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery. *Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol29, No 2.*, S. 255-268.

Proflute. (2011). Desiccant Silica Gel Rotor Product Information. Täby, Schweden.
Abgerufen am 20. Oktober 2011 von Datenblatt.

Proflute. (kein Datum). *Proflute Technology Leader*. Abgerufen am 29. Oktober 2011 von <http://www.proflute.se/properties.asp>

Qindao Double Dragon Industry Co, Ltd. (2011). *Qindao Double Dragon Industry Co, Ltd*.
Abgerufen am 20. Oktober 2011 von <http://www.silicagelsupplier.com/uploadfile/20110414225459.jpg>

Renouard-Vallet, G. (22. November 2010). Memorandum: usefull formulas. Hamburg,
Hamburg, Deutschland: Airbus Operations GmbH internes Dokument.

Ruvio, C. R., Costa, J. J., & Figueiredo, A. R. (November 2007). On the behaviour of
hygroscopic wheels: Part II - rotor performance. *International Journal of Heat and Mass
Transfer, Volume 50* , S. 4823-4832.

Schrader, C. (1. 8. 2008). Die Wasserspalter - Chemiker finden effiziente Methode,
Wasserstoff zu erzeugen. *Süddeutsche Zeitung vom 1.8.2008* .

Sun, J., & Besant, R. W. (November 2005). Heat and mass transfer during silica gel-moisture
interactions. *International Journal of Heat and mass transfer Volume 48* , S. 4953-4962.

Sura, M. (November 2004). Untersuchung der Produktwässer von PEM und SOFC
Brennstoffzellensystemen verschiedener Hersteller. *Diplomarbeit TU-Hamburg Harburg* .
Hamburg, Hamburg, Deutschland: TU Hamburg-Harburg.

Tschritter, H., Daßler, B., Knölle, G., Herbst, A., & Wiesner, R. (2006). *Patentnr.*
DE102006022685A1. Deutschland.

Ultra Electronics Precision Air Systems. (2010). *Technical Paper Airbus Dryer Unit Scale
Testing*. Gloucester: Ultra Electronics Precision Air Systems.

Wikimedia Foundation Inc. (24. Februar 2011). *WikipediA*. Abgerufen am 19. Oktober 2011
von http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Brennstoffzelle_funktionsprinzip.png

Zhang, L. Z., & Niu, J. L. (März 2002). Performance comparisons of desiccant wheels for air
dehumidification and enthalpy recovery. *Applied Thermal Engineering, Volume 22* , S. 1347-
1367.

9 ANHANG

9.1 LISTE DER SENSOREN

Tabelle 19: Liste der Sensoren und berechneten Werte der Datenaufzeichnung

Messgröße	Typ	Bezeichnung	Messgröße	Hersteller
Temperatur	Thermoelement TypK	TC1_1	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC1_2	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC2_1	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC2_2	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC3_1	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC3_2	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC3_2	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC_hz1	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	TC_hz2	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	ACE_K5_8_1_Cd_C Win	°C	LKM electronics
Temperatur	Thermoelement TypK	ACE_K5_8_2_Cd_C Wout	°C	LKM electronics
Temperatur	Pt100	ACE_1_1_Temp	°C	Kobold

Temperatur	Pt100	ACE_2_1_Temp	°C	Kobold
Temperatur	Pt100	ACE_3_1_Temp	°C	Kobold
Temperatur	Pt100	ACE_5_1_Temp	°C	Kobold
Druck	resistiv	ACE_1_2_Druck	mbar(g)	Kobold
Druck	resistiv	ACE_2_2_Druck	mbar(g)	Kobold
Druck	resistiv	ACE_3_2_Druck	mbar(g)	Kobold
Druck	resistiv	ACE_5_2_Druck	mbar(g)	Kobold
O₂ Konz.	elektrochem.	ACE_1_3_O2	Vol.-%	HTK
O₂ Konz.	elektrochem.	ACE_2_3_O2	Vol.-%	HTK
O₂ Konz.	elektrochem.	ACE_3_3_O2	Vol.-%	HTK
O₂ Konz.	elektrochem.	ACE_5_3_O2	Vol.-%	HTK
Rel. Feuchte	kapazitiv	ACE_1_4_RelFeuchte	%	Kobold
Rel. Feuchte	kapazitiv	ACE_2_4_RelFeuchte	%	Kobold
Rel. Feuchte	kapazitiv	ACE_3_4_RelFeuchte	%	Kobold
Rel. Feuchte	kapazitiv	ACE_5_4_RelFeuchte	%	Kobold
Volumen- strom	thermisch	ACE_8_3_MFM3	Nm ³ /h	VplInstrument s
Volumen- strom	thermisch	ECU_Airflow	slpm	nicht bekannt
Temperatur	Pt100	FCS_CoolingTemp	°C	nicht bekannt
Strom	induktiv	FCS_Current	A	nicht bekannt

Spannung		FCS_Voltage	V	nicht bekannt
Stöchiometrie	berechnet	ECU_CathodeStoich	-	berechnet
Absolute Feuchte	berechnet	OSIriS_x1	(g H ₂ O)/(kg Luft)	berechnet
Absolute Feuchte	berechnet	OSIriS_x2	(g H ₂ O)/(kg Luft)	berechnet
Absolute Feuchte	berechnet	OSIriS_x3	(g H ₂ O)/(kg Luft)	berechnet
Absolute Feuchte	berechnet	OSIriS_x4	(g H ₂ O)/(kg Luft)	berechnet
Leistung	-	Hz_ist	% of max. power	AEG Power Solutions
Betriebszu-stand BZ	berechnet	FCS_ECUSStatus	-	Hydrogenics berechnet

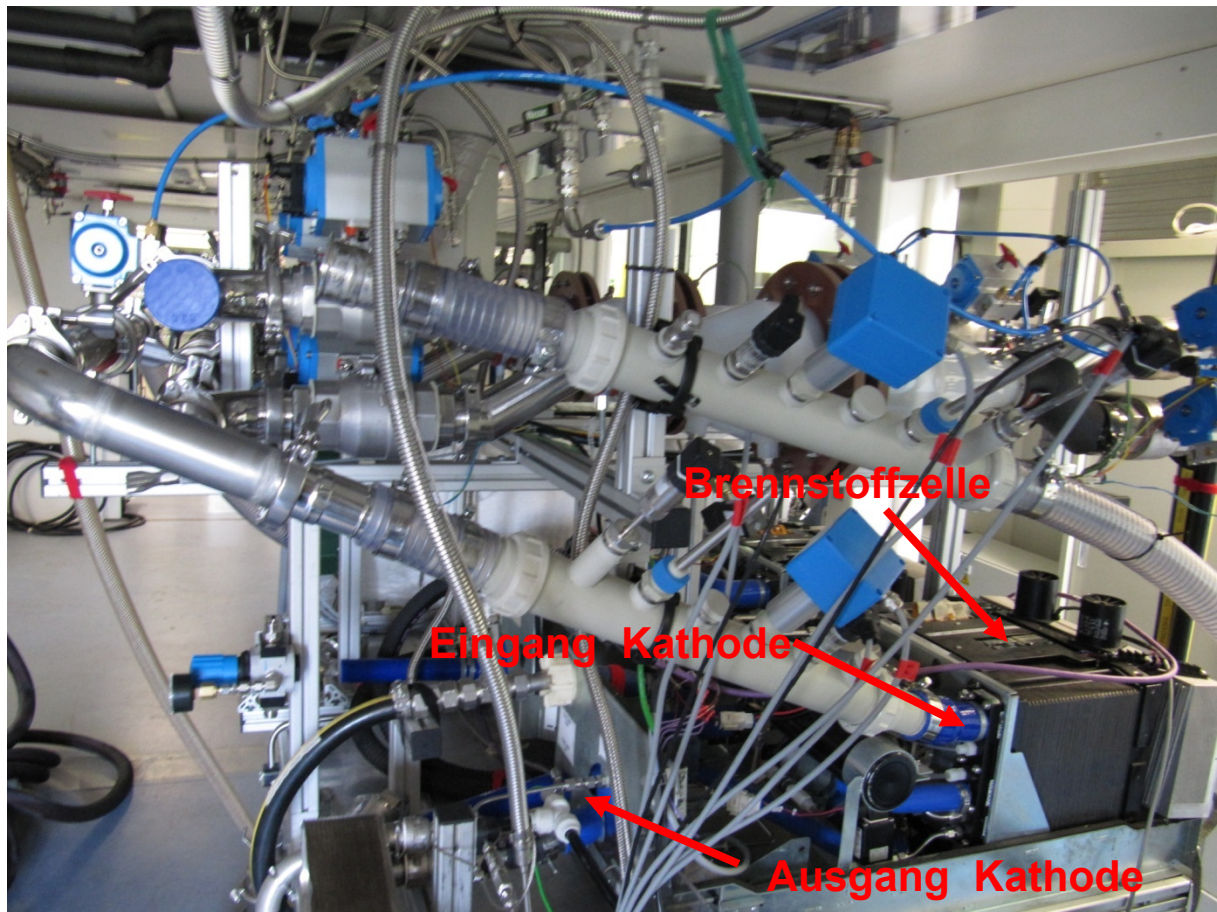


Abbildung 36: Brennstoffzelle Hydrogenics angeschlossen an den ODA Trockner

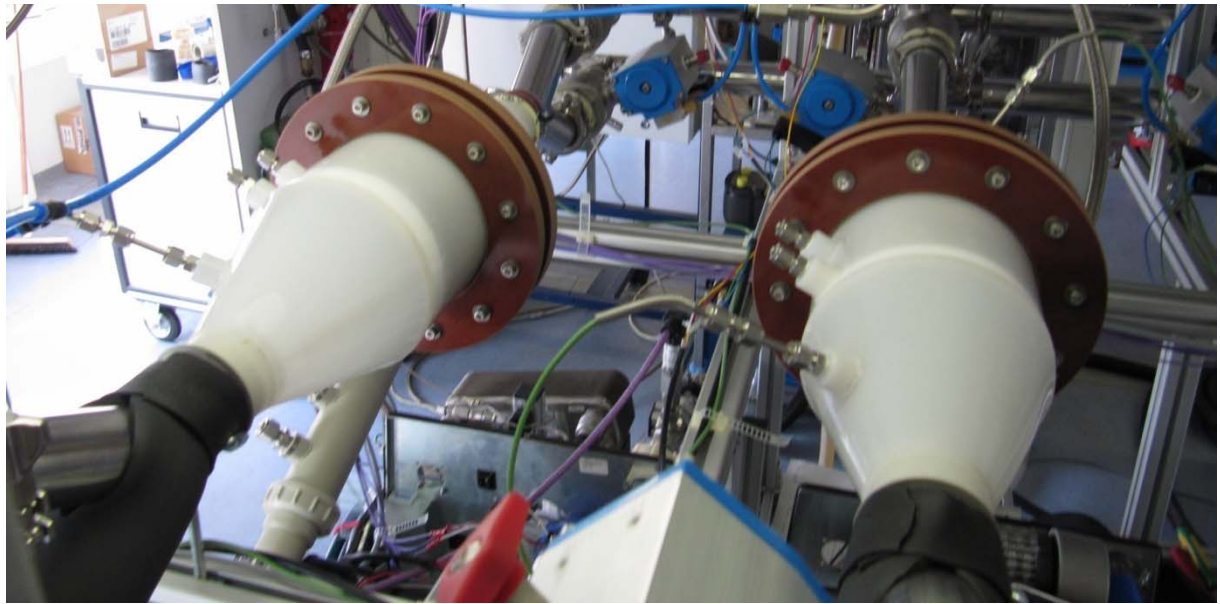


Abbildung 37: Kartuschen aus PVDF



Abbildung 38: Kondensator AlfaLaval Typ: AlfaNova 27



Abbildung 39: Zyklonabscheider Mankenberg Typ AS2



Abbildung 40: Klemmringverschraubung nach DIN32676

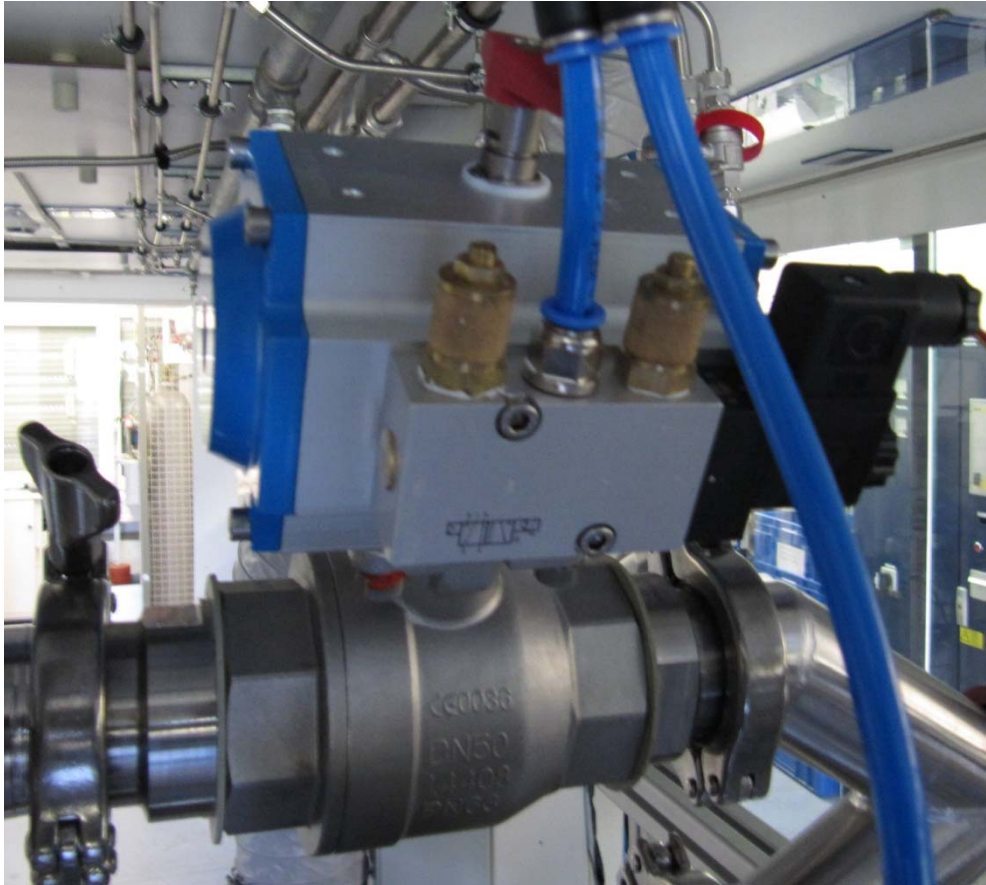


Abbildung 41: Pneumatikkugelhahn mit Steuerungsventil und Sinterbronzeschalldämpfer

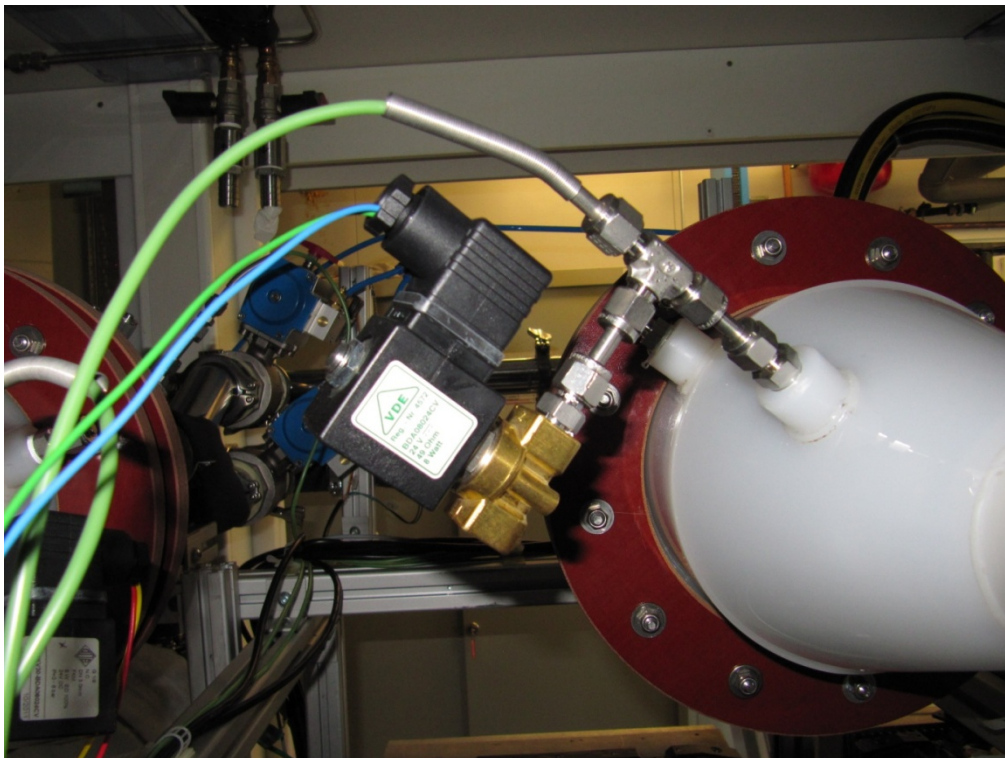


Abbildung 42: Belüftungsventil / Thermoelement Typ K



Abbildung 43: Heizer mit BCTEX Isolierung und eingeschraubten Heizelementen

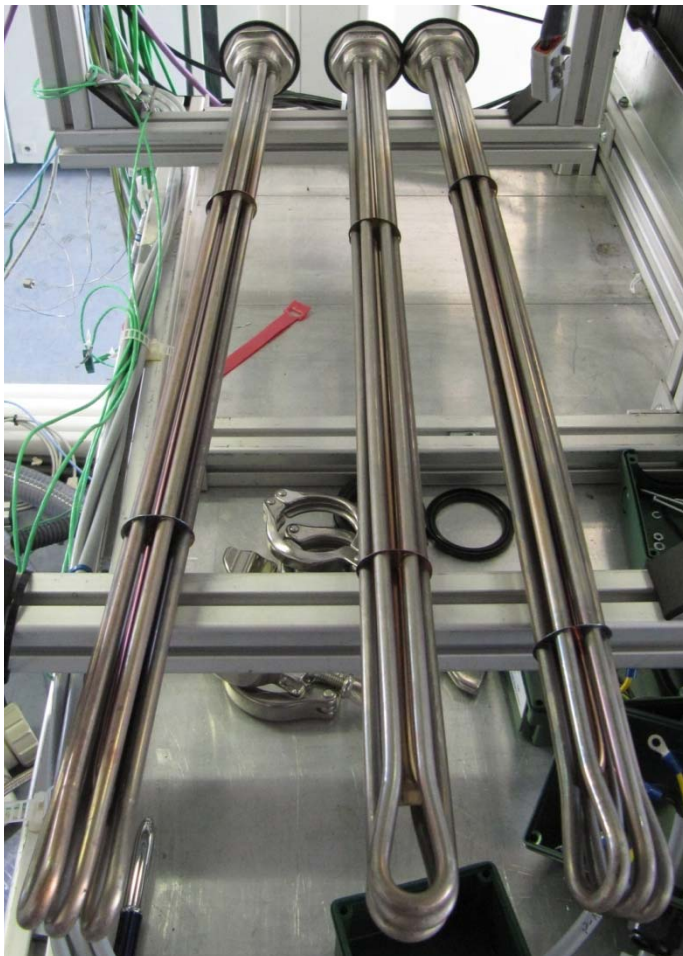


Abbildung 44: Heizelemente Carlo Loysch

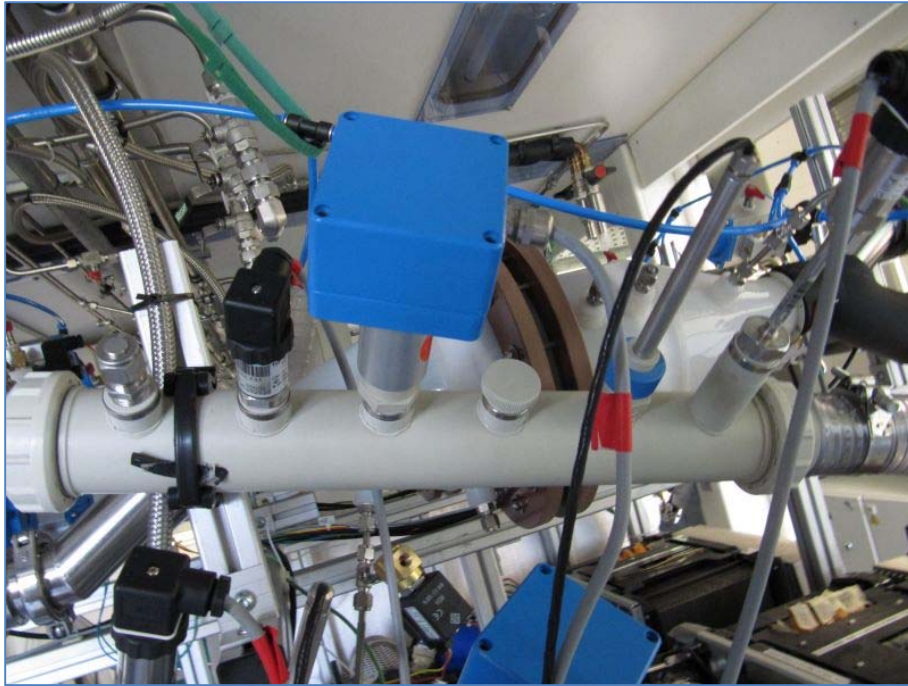


Abbildung 45: Messblock 2 mit Sensoren

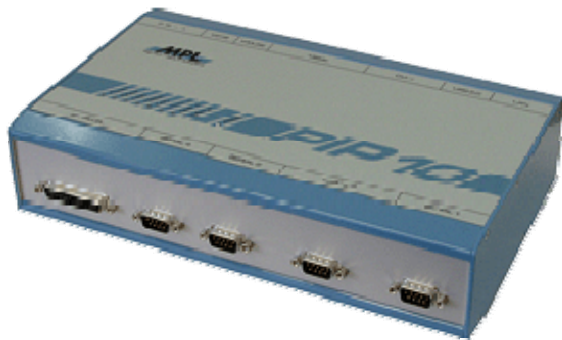


Abbildung 46: PIP10 industrial PC MPL

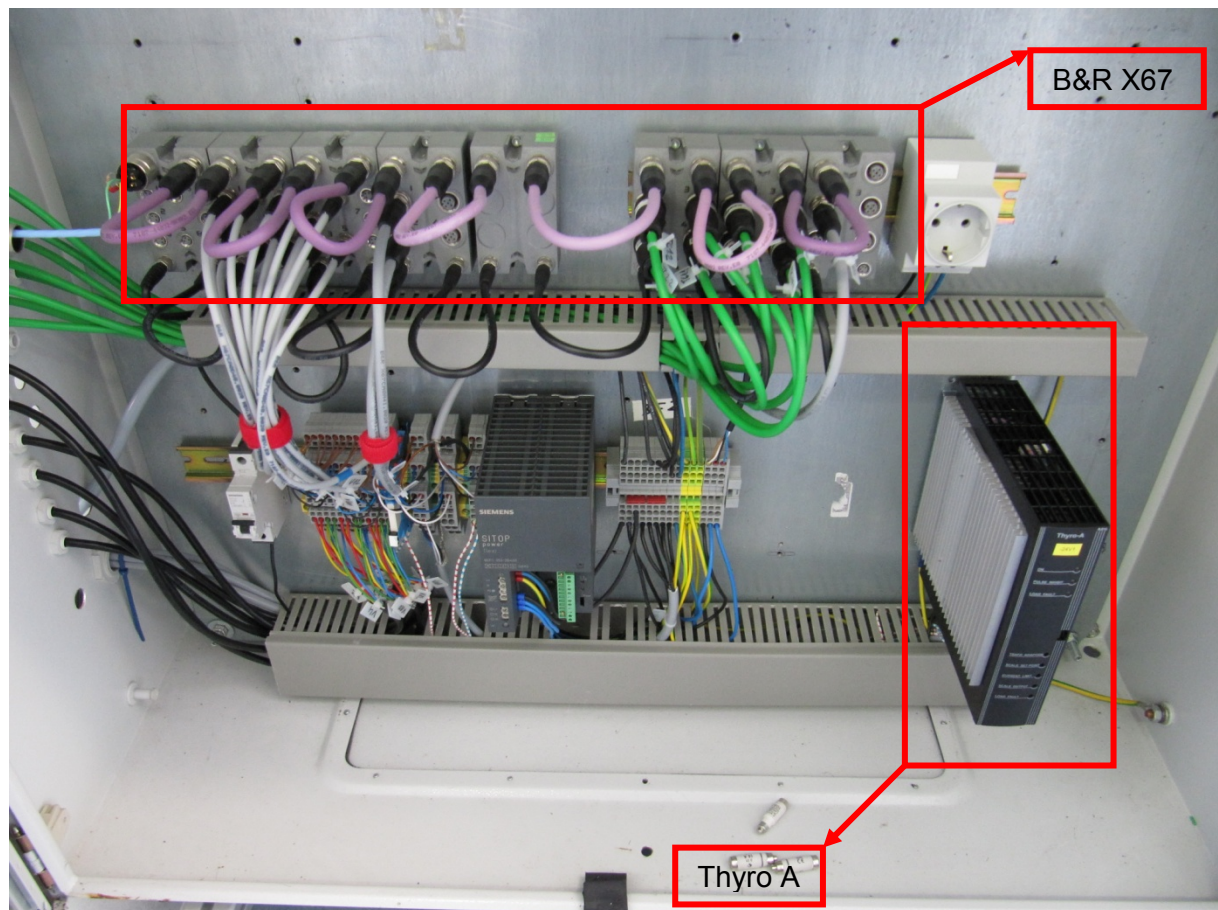


Abbildung 47: Steuerschrank OSIrS

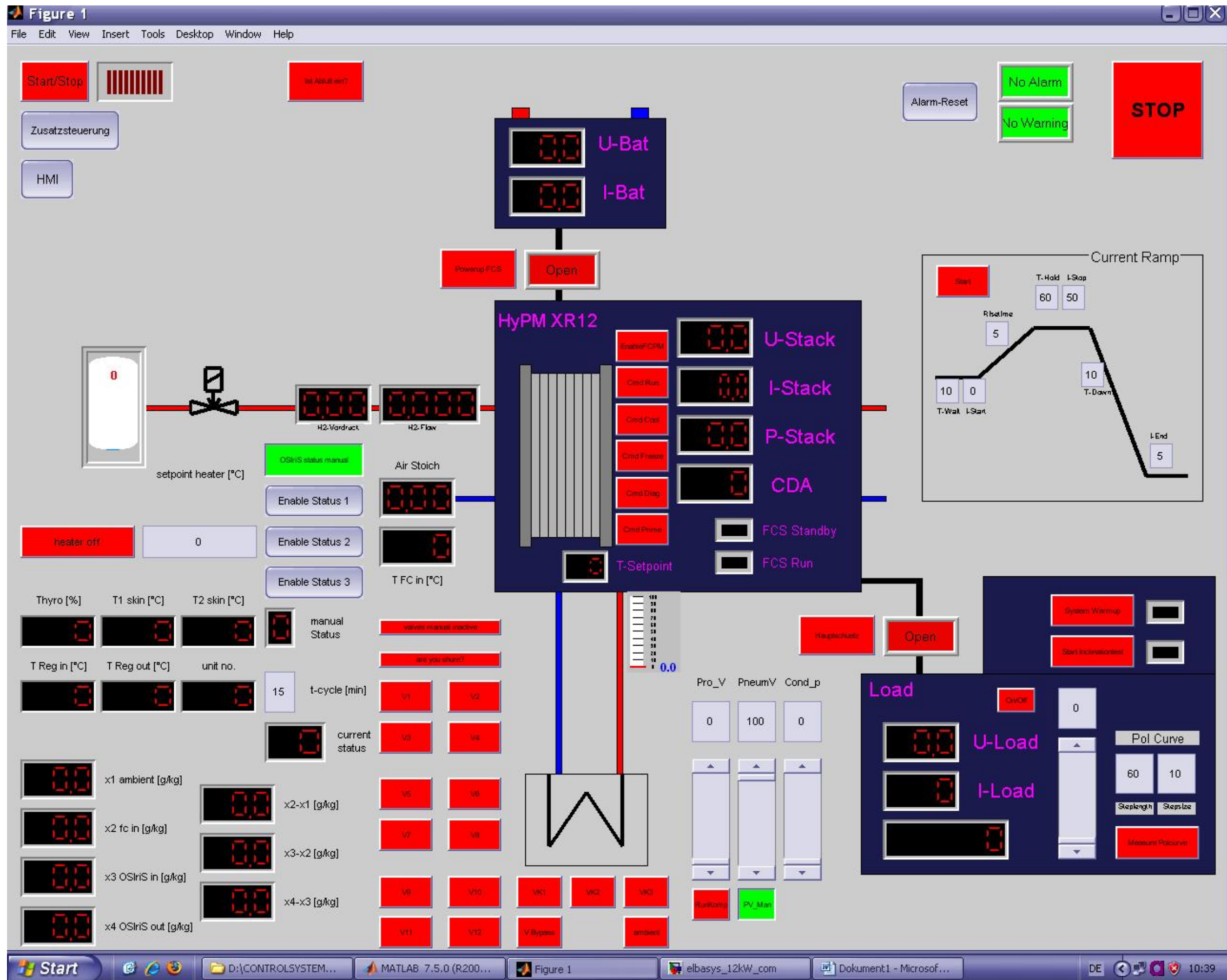


Abbildung 48: Graphical User Interface (GUI) OSiris

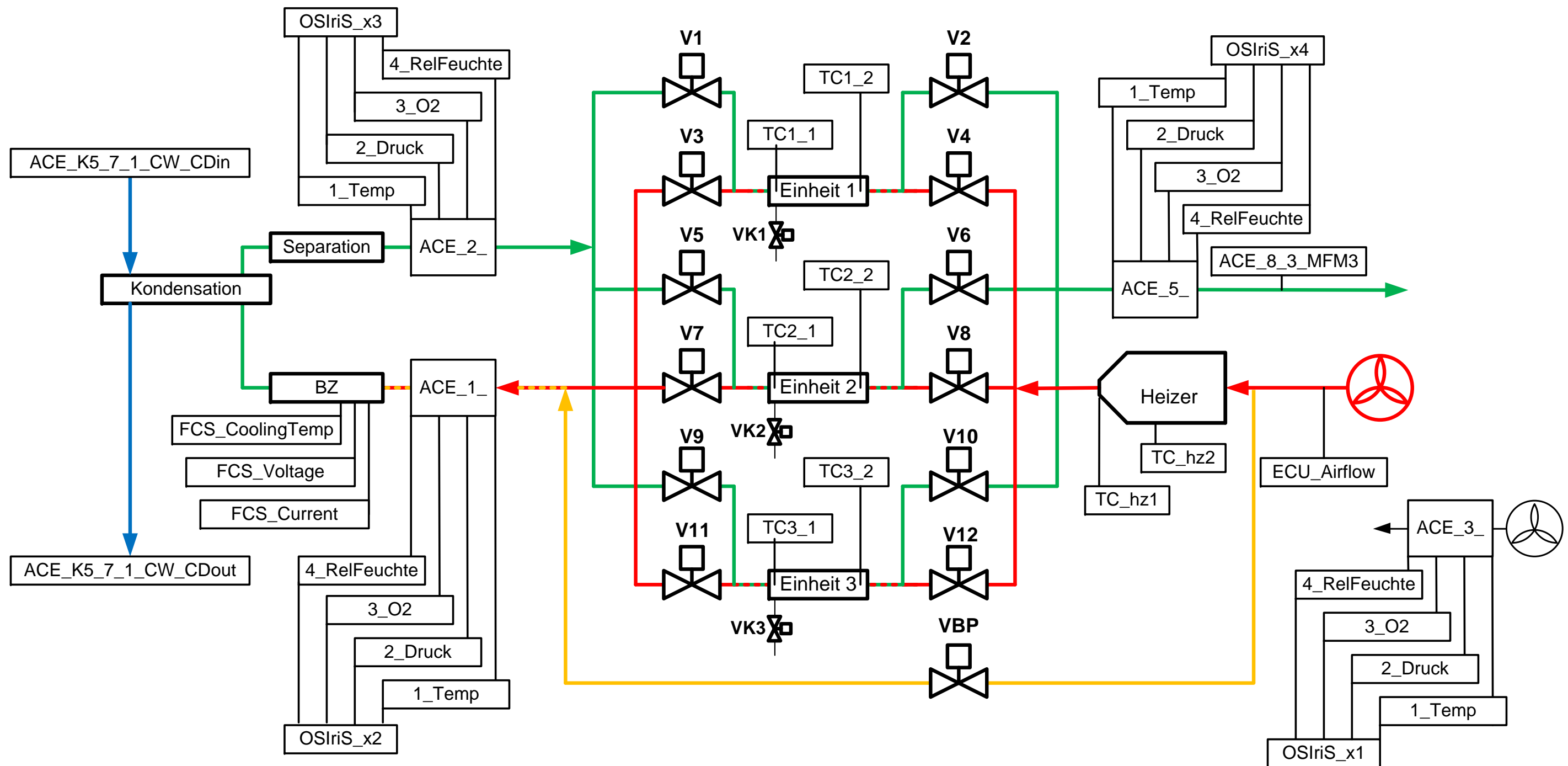


Abbildung 49: Positionen der Sensoren Großformat

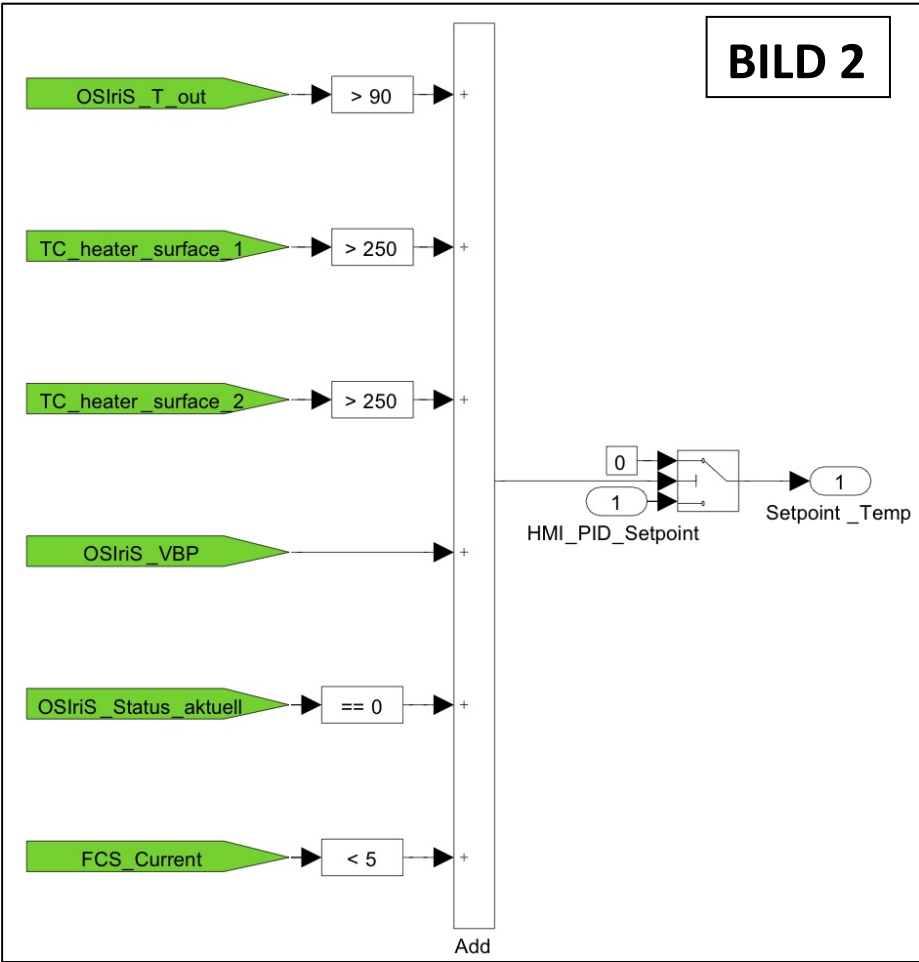
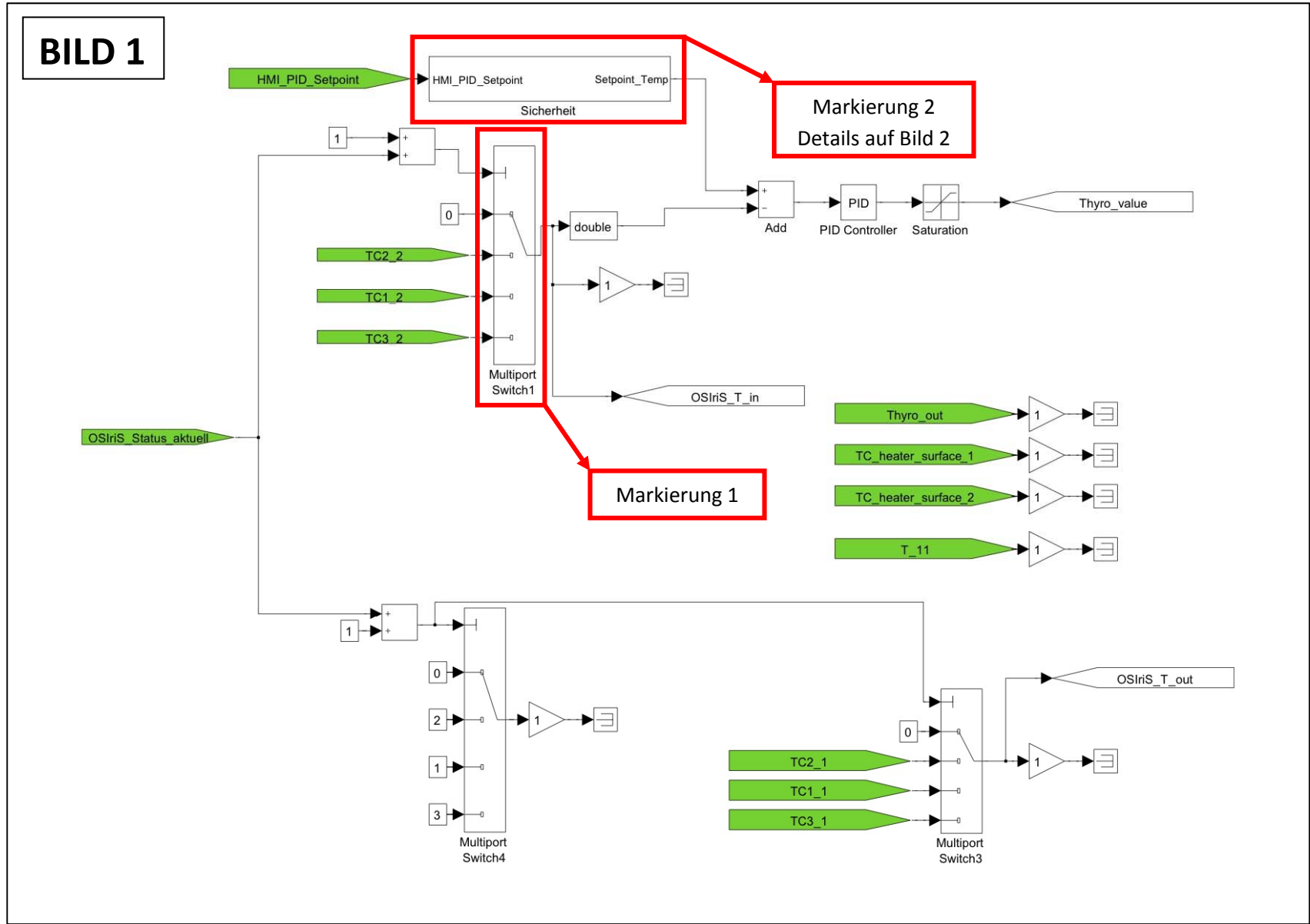


BILD3

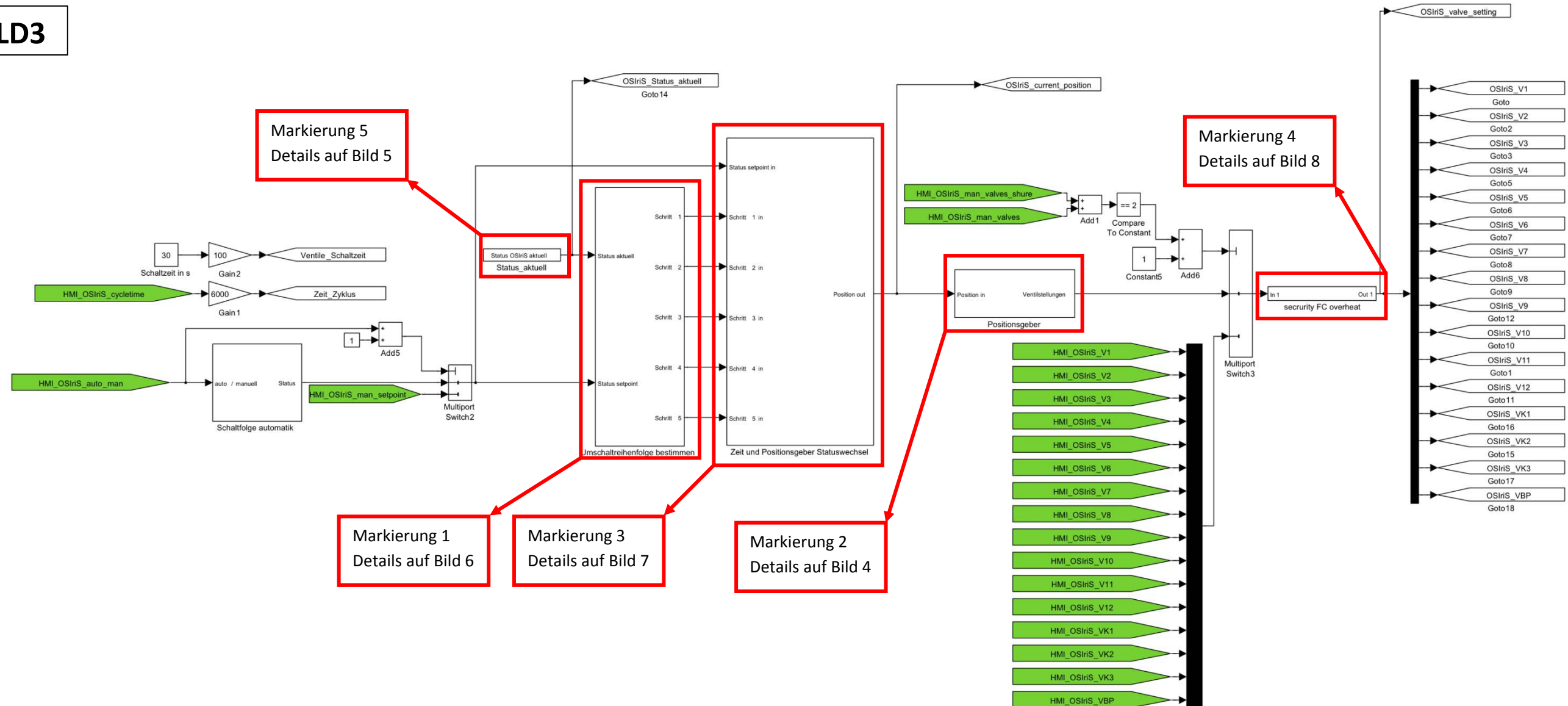


BILD 4

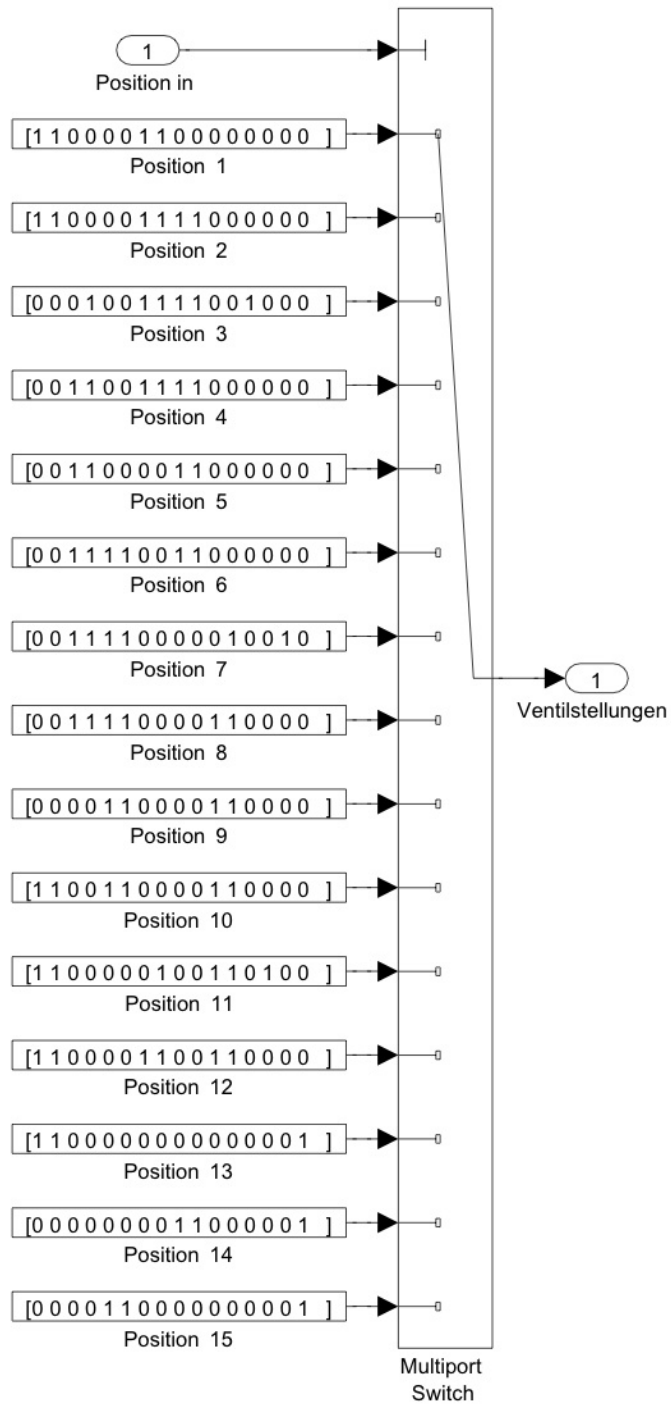


BILD 5

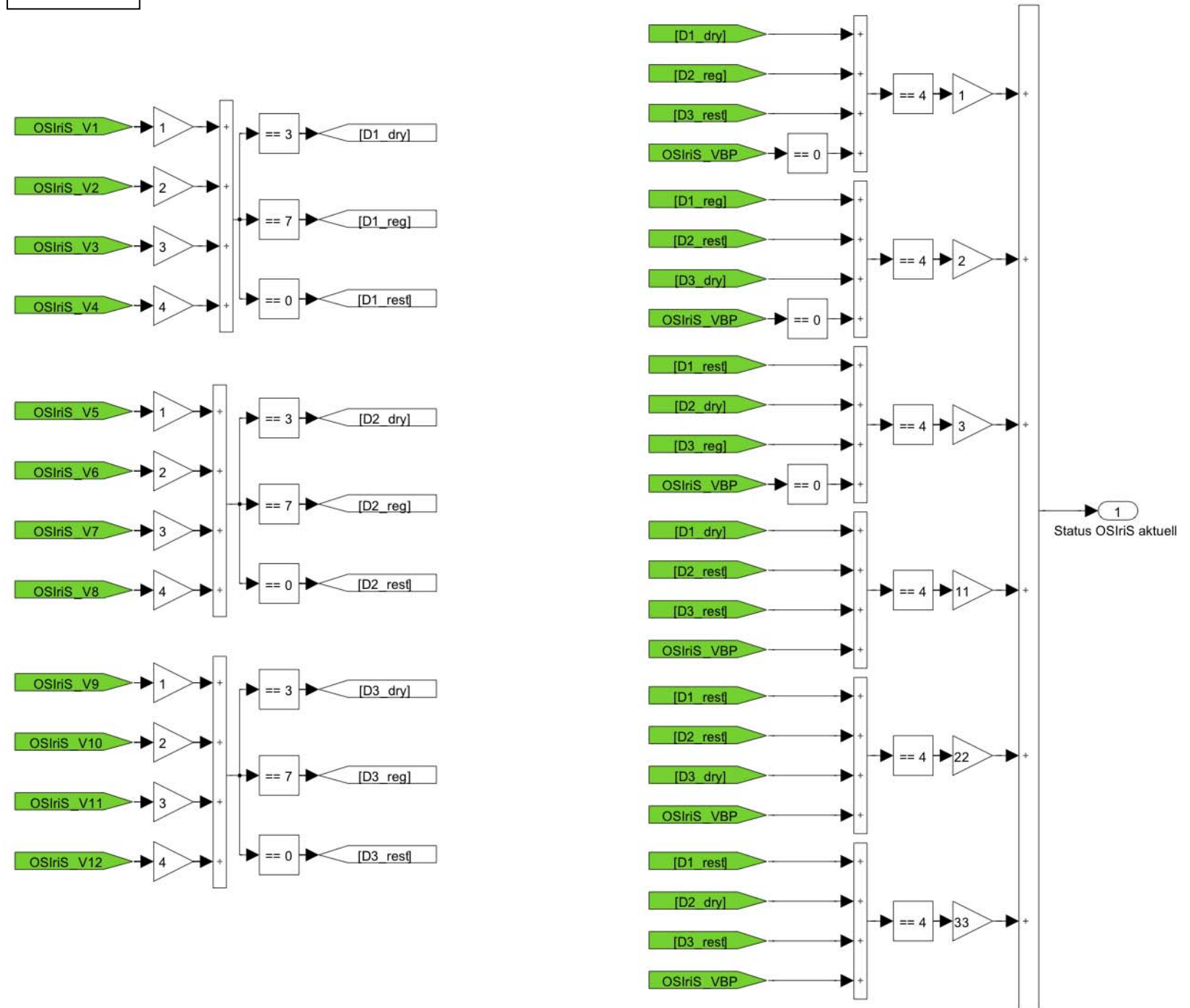


BILD 6

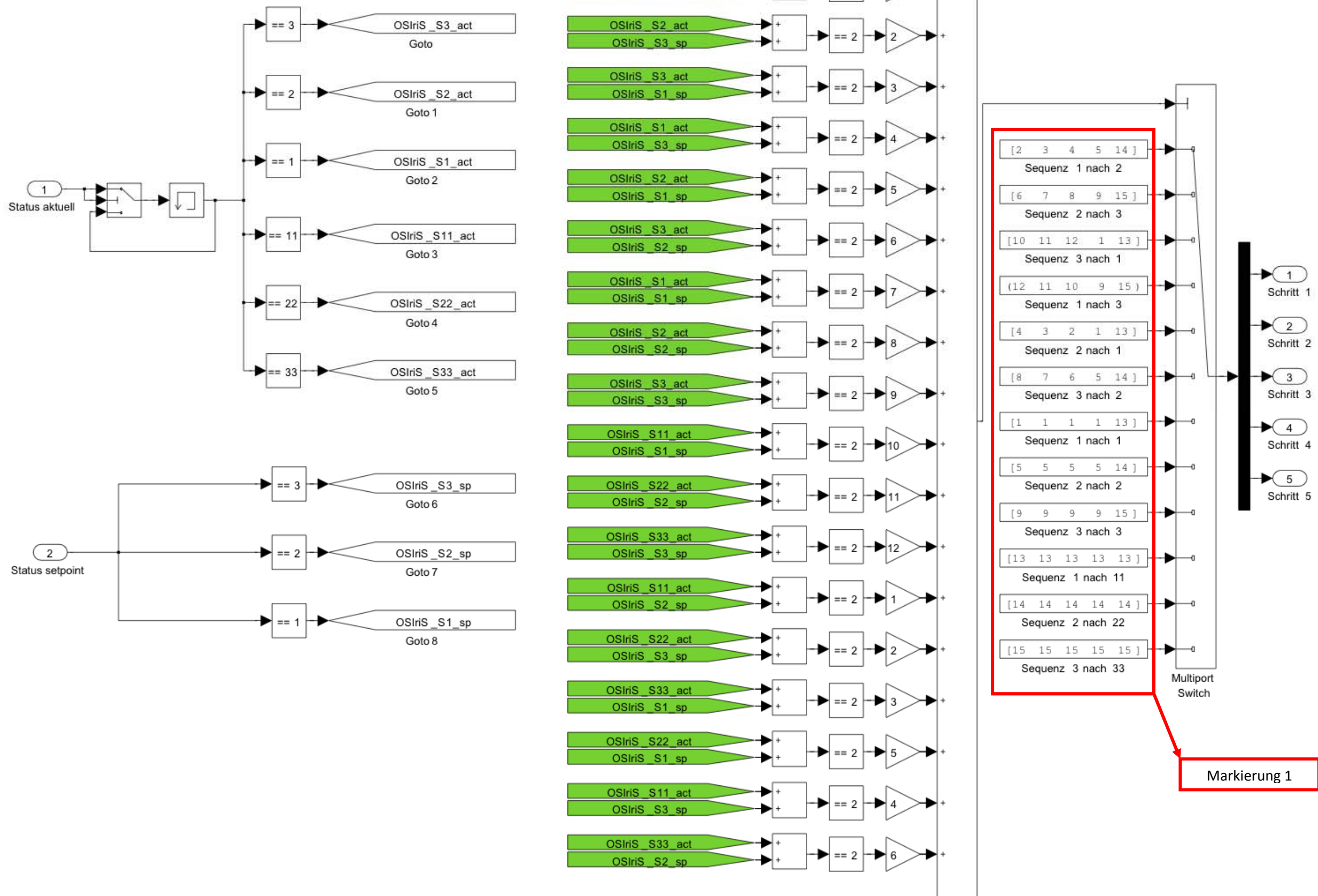


BILD 7

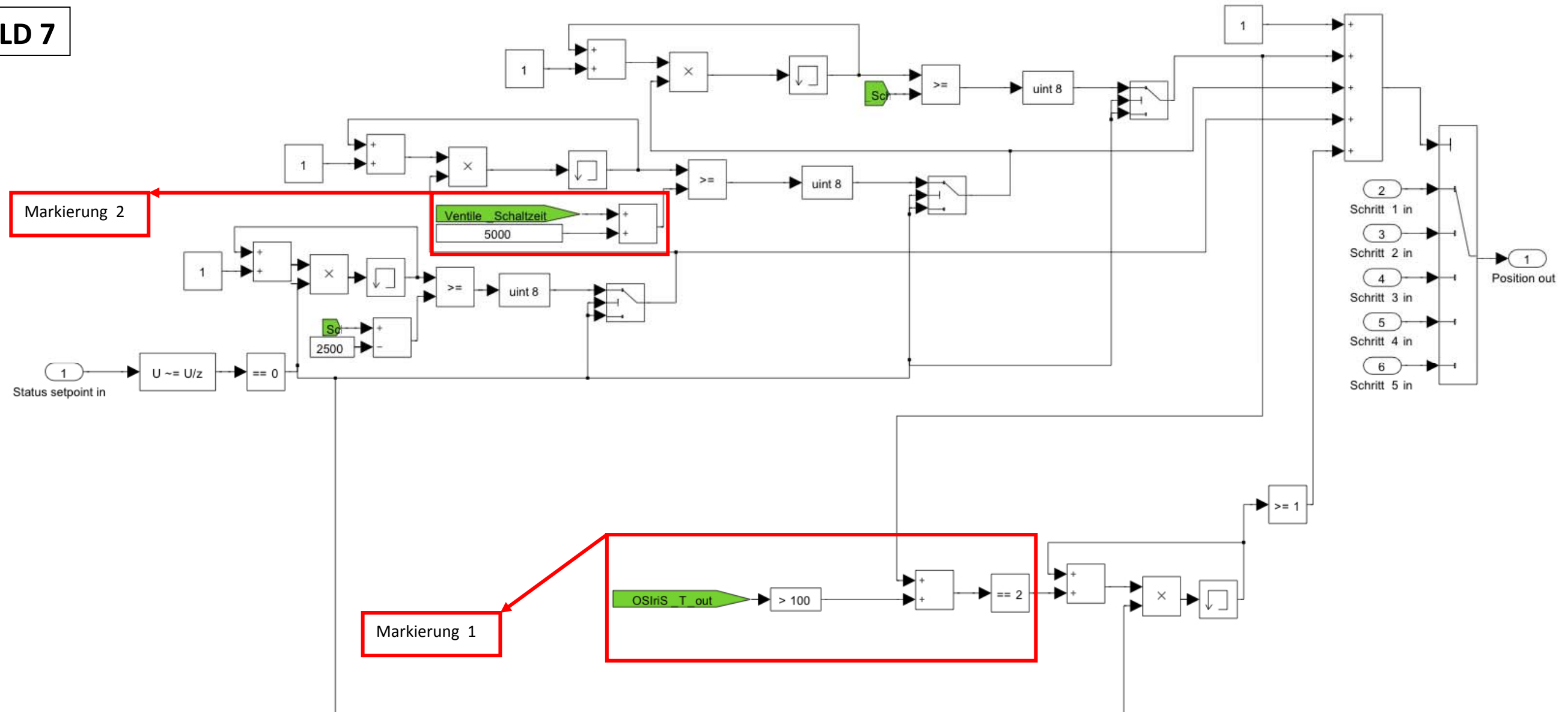


BILD 8

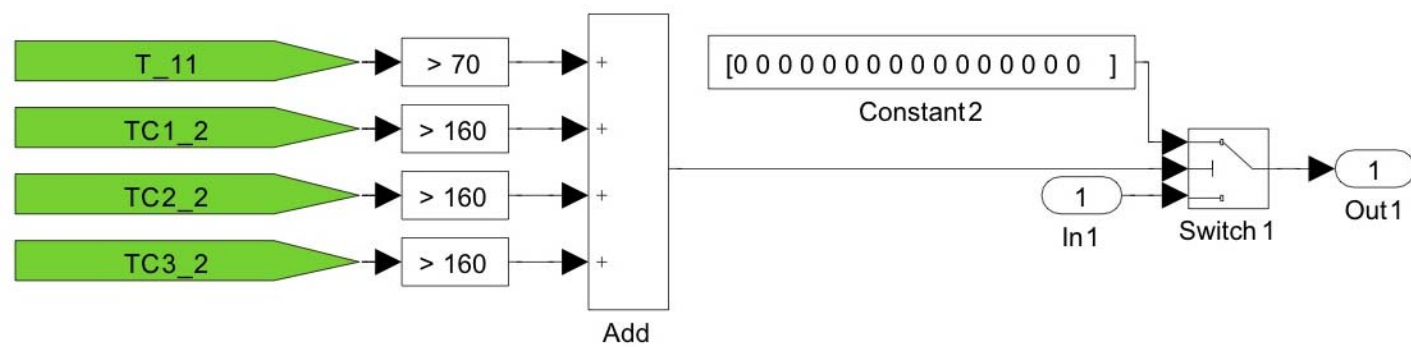


BILD 9

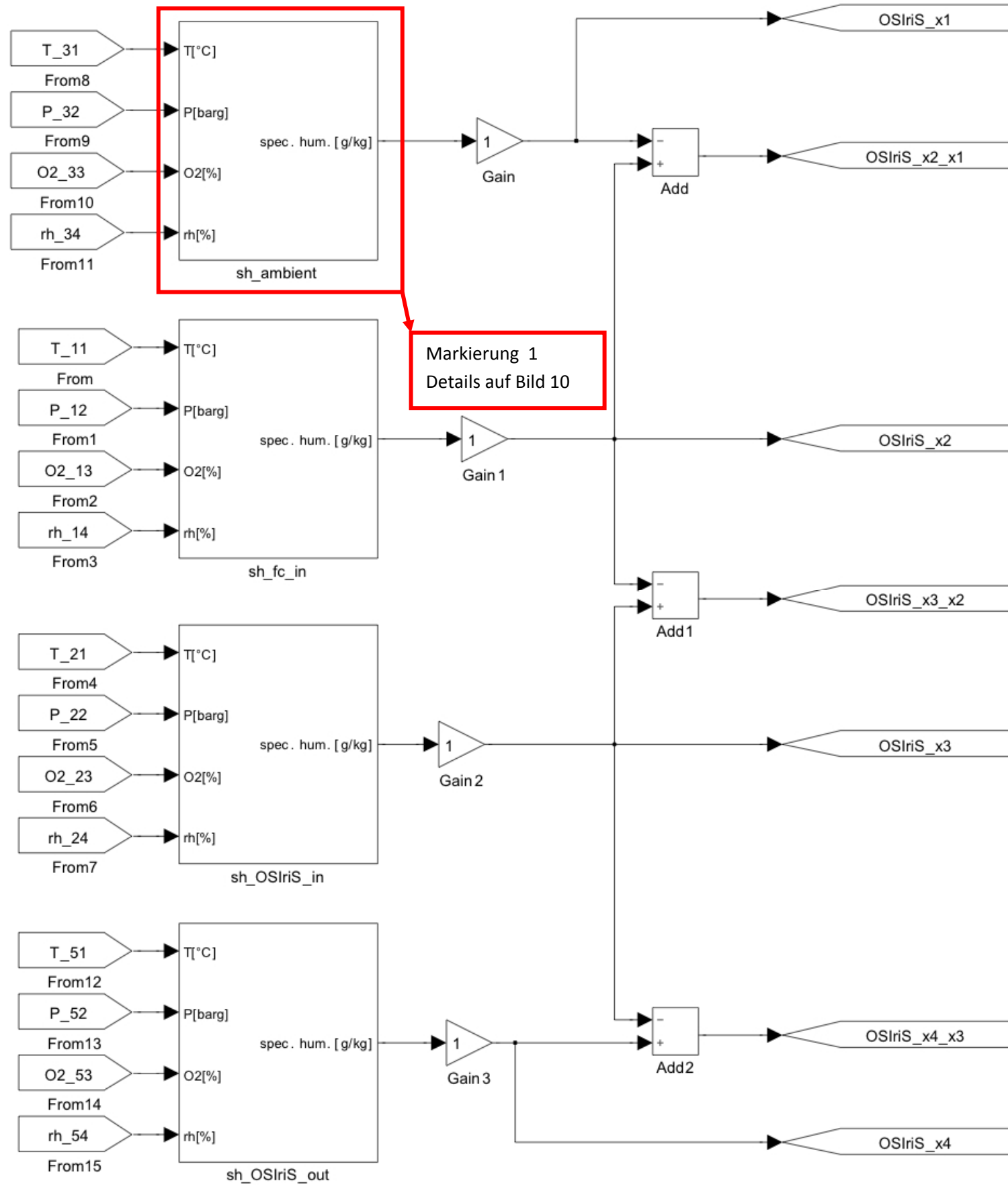


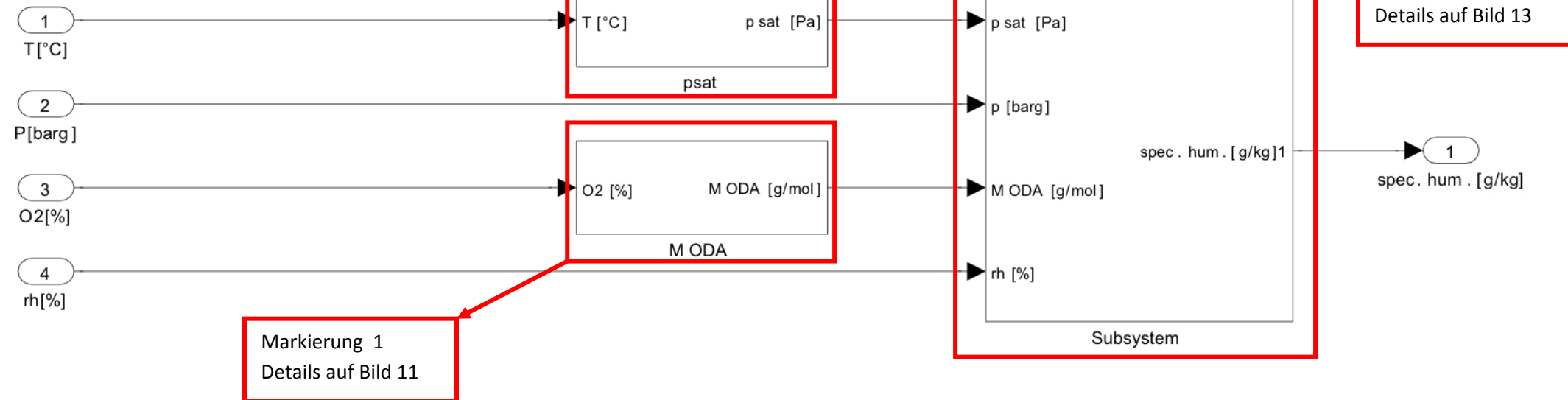
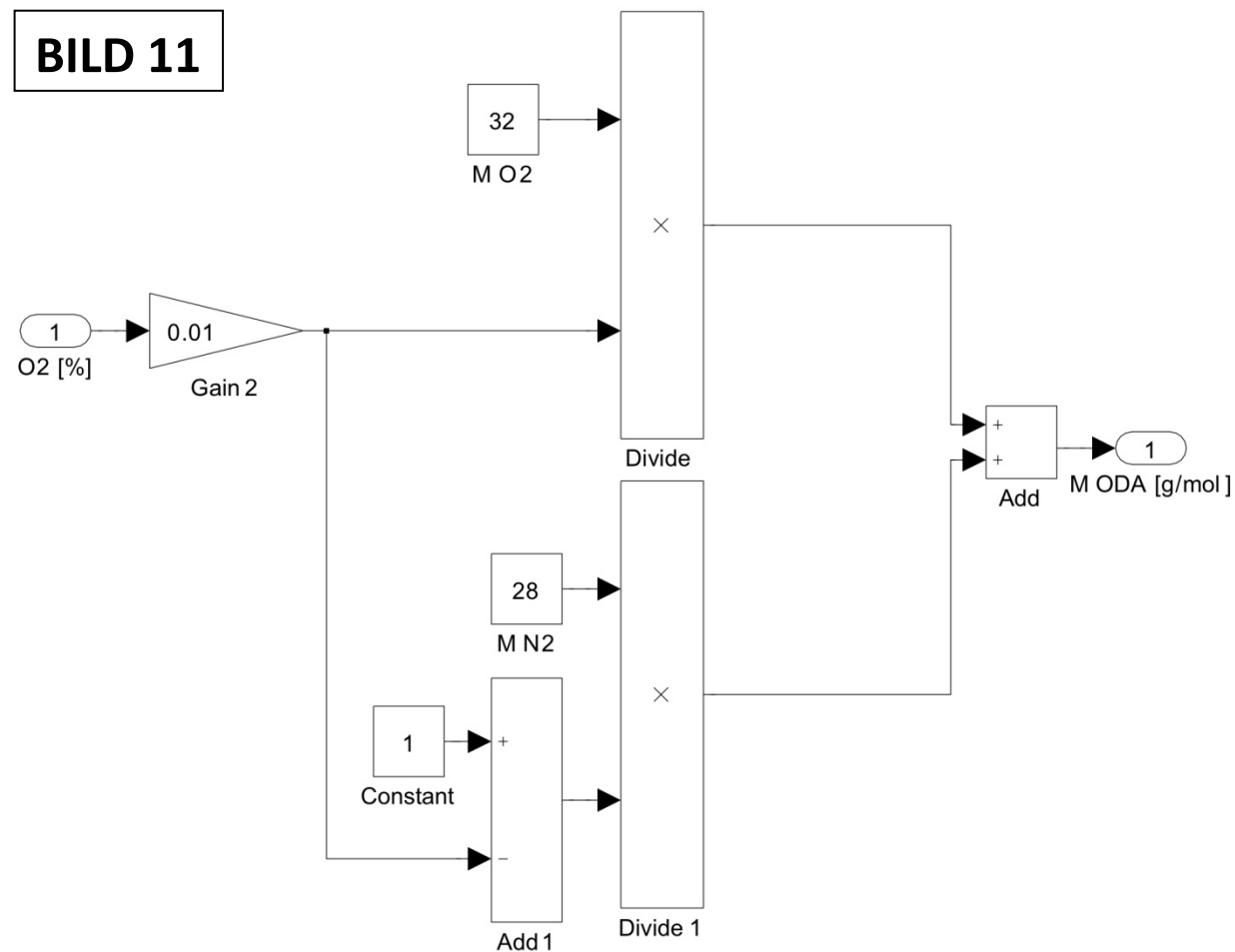
BILD 10**BILD 11**

BILD 12

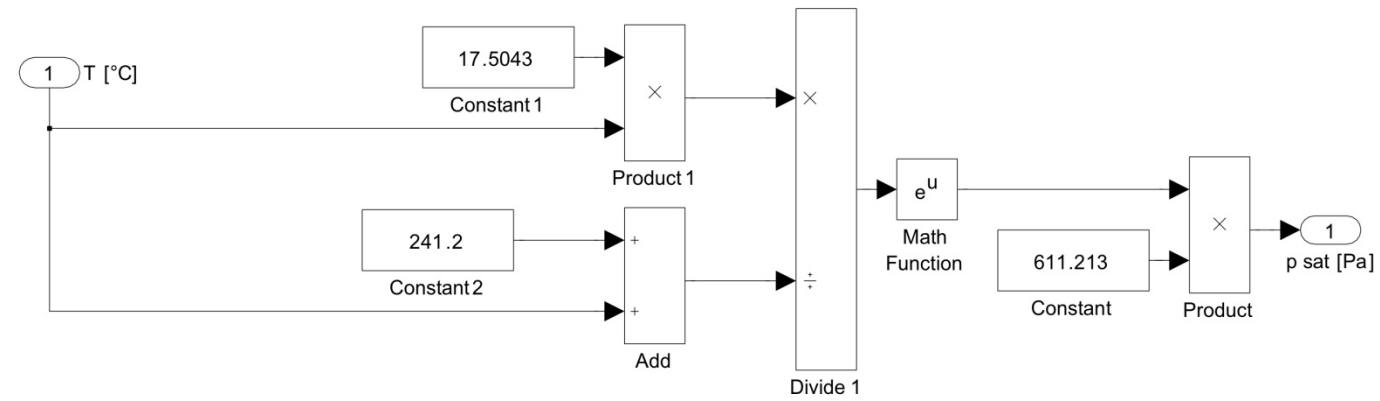
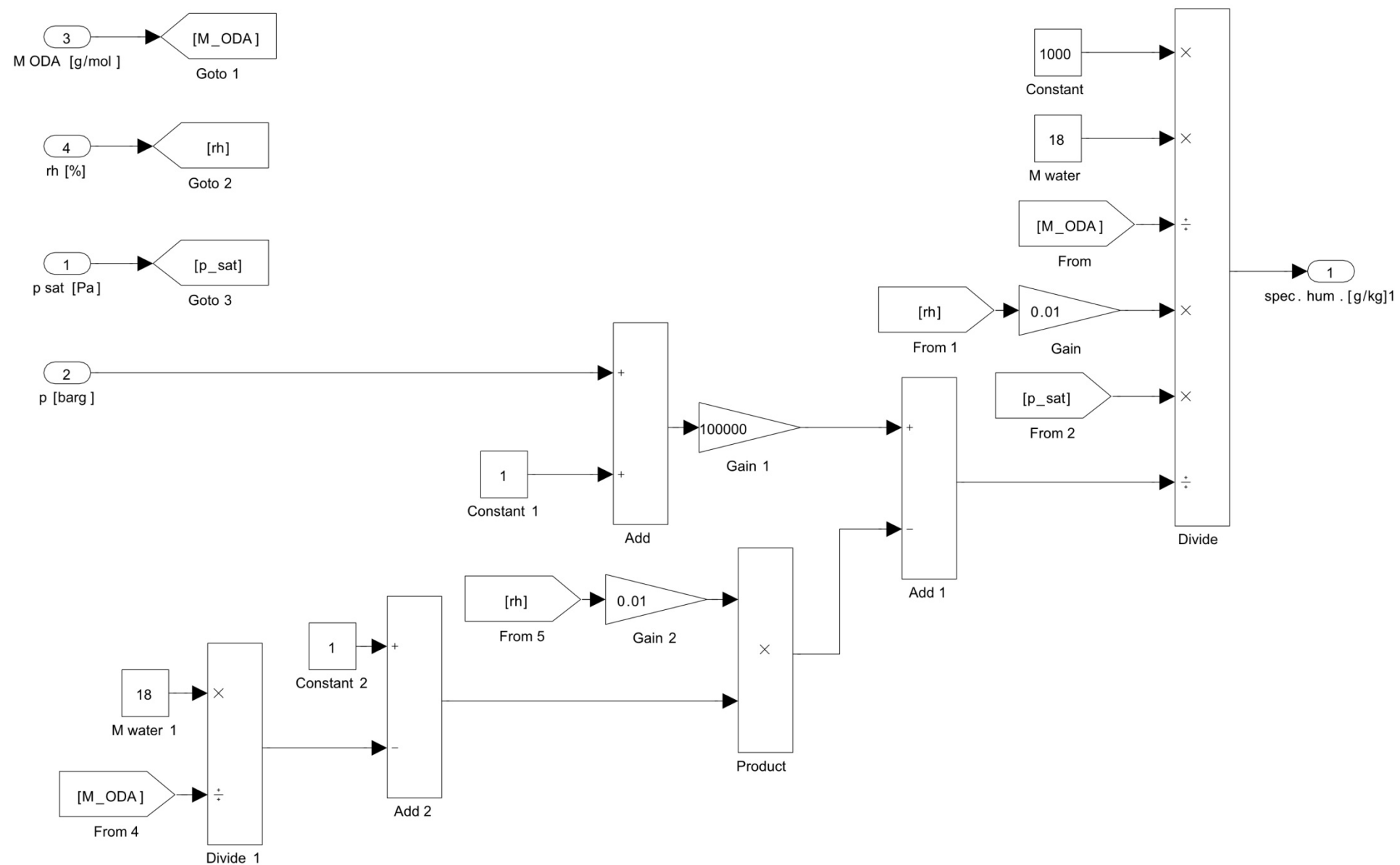
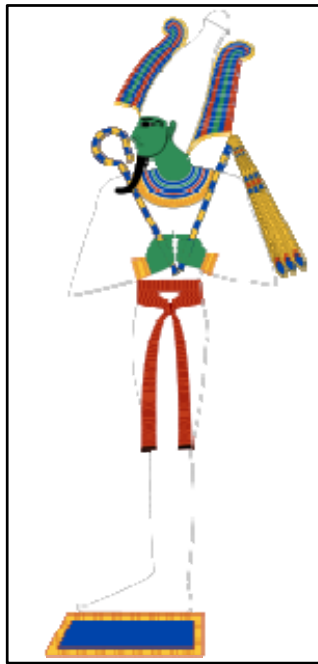


BILD 13



9.4 ERLÄUTERUNG ZUR GOTTHEIT OSIRIS

Der folgende Abschnitt ist 1:1 dem Internetbeitrag <http://de.wikipedia.org/wiki/Osiris> entnommen! Da dieses Kapitel nur der allgemeinen Information zum Namensgeber dieser Arbeit dienen soll und **NICHT** Teil der wissenschaftlichen Ausarbeitung ist, ist die Quelle im allgemeinen Literaturverzeichnis **NICHT** aufgeführt. Für die Richtigkeit des Artikels übernehme ich keine Garantie.



Osiris (übersetzt etwa: „Sitz des Auges“) ist der ägyptische Gott des Jenseits, der Wiedergeburt und des Nils. Der zugehörige Osirismythos gilt als übertragener Mythos auf die Natur, ohne dass Osiris selbst als Vegetationsgott wirkt. Dennoch wird vereinzelt in der Literatur zu Unrecht die Gleichsetzung mit einem Vegetationsgott vorgenommen. Sein Hauptkultort war Abydos. Als vierter König der ersten Götterdynastie fungierte er auch als Bestandteil der Götterneunheit von Heliopolis. In den Pyramidentexten galt Osiris als „Gott des Nordens“.

Mit Beginn der 4. Dynastie taucht in den Opferformeln der Privatgräber ein namenloser Gott auf; am Ende der 4. Dynastie dann erstmals namentlich als Osiris. Die früheste ikonografische Darstellung der Gottheit Osiris ist auf einem Block des Pyramidenbezirks des Djedkare belegt, vorletzter Herrscher der 5. Dynastie. Unter Unas, dem Nachfolger und letzten König der 5. Dynastie, folgt die erstmalige schriftliche Erwähnung in den Pyramidentexten. Zunächst nahm Osiris im Königs kult eine untergeordnete Rolle ein, da Osiris zwar als *Gott der Verstorbenen* galt, aber nicht als *Gott des Königs*. Der König sah sich mythologisch auf gleicher Ebene und bezeichnete sich daher als *sein Bruder, der mit den Kräften des Osiris ausgestattet ist*. Osiris herrschte in diesem Stadium als *Gott über die menschlichen Verstorbenen*, während sich der König nach seinem Tod als *Gott über die ruhenden Götter im Jenseits* verstand. Insofern repräsentierte Osiris den *Totengott des Volkes* und der König den *Totengott der Götter*. Erst mit dem Zusammenbruch des Alten Reiches änderte sich die königliche Distanz zu Osiris.

Mit Beginn des Mittleren Reiches erhielt Osiris in der ägyptischen Mythologie die gesamte Macht über das Totenreich und stand seither in der Rangordnung über dem König. Seine Bedeutung als einer der wichtigsten Götter des Alten Ägyptens nahm im weiteren Verlauf der altägyptischen Geschichte stetig zu, weshalb sich sein Kult auch über die hellenistische Welt verbreiten konnte. Osiris bildete zusammen mit Horus und Isis die Triade von Abydos.